



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

IDENTIFICACIÓN DEL IMPACTO PRODUCIDO POR LA MINERÍA EN QUIMSACOA EN LA RECARGA DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

*Trabajo de Titulación previo
a la obtención del Título de
Ingeniero Civil*

Autora:

Carla Elizabeth Pesántez Parra

C.I. 1900483866

Director:

Ing. Pablo Ismael Guzmán Cárdenas, PhD

C.I. 0102260106

Cuenca – Ecuador

2017



RESUMEN

El agua puede ser un recurso natural renovable en tanto que exista el conocimiento y control apropiados de las actividades que impactan su ciclo. Los páramos andinos regulan este recurso debido a sus características de clima, vegetación y suelo, impactos producidos en estas zonas representan una potencial pérdida de capacidad de regulación, causando pérdidas irremediables.

Cambios en la recarga y/o almacenamiento en el suelo representan un importante aspecto de la afección producida por el hombre en la zonas de páramo. Este trabajo, analiza caudales base, los cuales pueden ser conceptualizados como una expresión de recarga y almacenamiento. El análisis de flujos base se lo realiza a través de diferentes modelos, y partiendo de este análisis se establece el posible grado de afección a nivel de tres microcuencas, Calluancay, Zhurucay, Quinuahuaycu, pertenecientes al área de Quimsacocha.

El área de Quimsacocha, pertenece a la zona paramera de los Andes, ubicado en la parroquia Victoria del Portete, provincia del Azuay, a una altura de 3.960 m.s.n.m, con un clima frío y una humedad relativa alta. En esta zona se prevé explotación minera de tipo subterránea a gran escala, Loma Larga, que se encuentra en una fase de exploración avanzada.

Este trabajo destaca los potenciales impactos en los flujos base y recarga de agua, de las tres microcuencas. Se explican posibles cambios como la disminución de caudales base y almacenamiento. Se da a conocer una posible afección futura en la regulación del agua con la implementación de una actividad minera.

Palabras clave: PÁRAMO, REGULACIÓN, MINERÍA, PRECIPITACIÓN, CAUDAL, FLUJO BASE, RECARGA.



Abstract

Water can be a renewable natural resource as long as there is appropriate knowledge and control of activities that impact its cycle. The Andean páramos regulate this resource due to its characteristics of climate, vegetation and soil, impacts produced in these zones represent a potential waste of capacity of regulation, causing irremediable losses.

Changes in soil recharge and/or storage represent an important aspect of the artificial condition in páramo areas. This work analyzes the basic flow rates, which can be conceptualized as an expression of recharge and storage. The analysis of the base flows is done through different models, and from this analysis the possible degree of affection is established at the level of three microcatchments, Calluancay, Zhurucay, Quinuahuaycu, belonging to the Quimsacocha area.

The area of Quimsacocha belongs to the Andes, located in the parish of Victoria del Portete, Azuay province, at a height of 3.960 m.a.s.l, with a cold climate and high relative humidity. Large-scale underground mining, Loma Larga, is located in the area with advanced exploration.

This investigation highlights the potential impacts on the base flows and water recharge of the three microcatchments. Possible changes such as the reduction of base flows and storage are explained. A possible future condition in the regulation of water is revealed with the implementation of a mining activity.

Key words: PÁRAMO, REGULATION, MINING, RAINFALL, STREAM FALL, BASE FLOW, RECHARGE.



ÍNDICE

Resumen.....	2
Abstract.....	3
ÍNDICE.....	4
Cláusulas de Responsabilidad.....	7
Agradecimiento.....	9
Dedicatoria.....	10
Introducción.....	11
1. Descripción del área de estudio.....	13
1.1 El páramo.....	13
1.2 Páramo Ecuatoriano.....	13
1.2.1 Vegetación y suelos.....	13
1.2.2 Hidrología y características hidráulicas de los suelos.....	16
1.2.3 Clima.....	17
1.3 Área de estudio.....	18
1.3.1 Modelos perceptivos.....	20
1.3.2 Planes mineros en el páramo de Quimsacocha.....	21
1.4 Definición del problema.....	21
1.5 Objetivos.....	22
1.5.1 Objetivo principal.....	22
1.5.2 Objetivos secundarios.....	22
1.6 Estructura del Trabajo de Titulación.....	22
2. Prácticas mineras en los Andes.....	23
2.1 Minería en los Andes.....	23
2.2 Descripción de las minas en los Andes.....	23
2.2.1 Mina Kori Kollo, Oruro, Bolivia.....	24
2.2.2 Mina de volcán, Cerro de Pasco, Perú.....	25
2.2.3 Mina de Yanacocha, Cajamarca, Perú.....	25
2.3 Estudios de los problemas relacionados a la degradación ambiental.....	26
2.3.1 Causas de la contaminación.....	27



2.3.2 Datos sobre disponibilidad y calidad del agua y suelo.....	28
2.3.2.1 Disponibilidad del agua.....	28
2.3.2.2 Calidad del agua.....	29
2.3.2.3 Disponibilidad y calidad del suelo.....	30
2.3.3 Discusión de los datos.....	31
2.3.3.1 Disponibilidad y calidad del agua.....	31
2.3.3.2 Calidad del suelo.....	32
2.3.3.3 Impactos sociales y económicos.....	33
2.3.4 Conclusión.....	33
3. Métodos de obtención de flujo base para el área de Quimsacocha.....	34
3.1 Datos meteorológicos e hidrogeológicos de las tres microcuencas.....	34
3.1.1 Calidad de la serie cronológica.....	35
3.2 Evaluación del flujo base.....	36
3.2.1 Filtros digitales.....	37
3.2.2 Regresión no lineal.....	38
3.2.3 Filtros físicos.....	39
4. Resultados y discusión.....	41
4.1 Resultados obtenidos por método de aplicación.....	41
4.1.1 Filtros digitales.....	41
4.1.2 Regresión no lineal.....	42
4.1.4 Filtros Físicos.....	42
4.2 Resultados Generales.....	44
5. Conclusiones y recomendaciones.....	46
5.1 Conclusiones.....	46
5.2 Recomendaciones.....	49
6. Bibliografía y referencias.....	50
7. Anexos.....	56
7.1 Anexo 1.....	56
7.1.1 Resultado de cada microcuenca con cada método de análisis.....	56
7.1.1.1 Filtros digitales.....	56
7.1.1.2 Regresión no lineal.....	57
7.1.1.2.1 Microcuenca Calluancay.....	57



7.1.1.2.2 Microcuenca Zhurucay.....	58
7.1.1.2.3 Microcuenca Quinuahuaycu.....	59
7.1.1.3 Filtros físicos.....	60
7.1.2 Resultados de cada microcuenca con los tres métodos de análisis.....	62



Carla Elizabeth Pesántez Parra, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del Trabajo de Titulación, **"IDENTIFICACIÓN DEL IMPACTO PRODUCIDO POR LA MINERÍA EN QUIMSACOA EN LA RECARGA DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO"**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 19 de Octubre de 2017

Carla Elizabeth Pesántez Parra

C.I: 1900483866



Universidad de Cuenca



Universidad de Cuenca
Cláusula de Propiedad Intelectual

Carla Elizabeth Pesántez Parra, autora del trabajo de titulación,
**"IDENTIFICACIÓN DEL IMPACTO PRODUCIDO POR LA MINERÍA EN
QUIMSACocha EN LA RECARGA DE AGUAS SUPERFICIALES Y
SUBTERRÁNEAS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO"**,
certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente
investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 19 de Octubre de 2017

Carla Elizabeth Pesántez Parra

C.I: 1900483866



Agradecimiento

Al Ingeniero Pablo Guzmán Cárdenas por su dirección, gran enseñanza y constante apoyo en la realización de este trabajo de investigación. Al Programa para el Manejo de Agua y Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca por la serie de datos otorgados para el análisis de esta investigación.

Carla Elizabeth Pesántez Parra

Cuenca, Octubre de 2017



Dedicatoria

A mi hijo que es mi mayor alegría, a mi esposo por el apoyo incondicional en todo momento, a mis padres que son los que hicieron posible este título, a mi hermano, tíos y abuela.

Carla,

Cuenca, Octubre de 2017



Introducción

De todas las actividades de nuestro planeta, ninguna fuerza es tan grande como la del ciclo hidrológico.

Richard Bangs y Christian Kallen.

Los páramos andinos, forman parte de un ecosistema montano intertropical con predominio de vegetación tipo herbáceo y suelos (Androsoles) caracterizados por su alta capacidad de almacenamiento y conductividad hidráulica. Son los responsables principales de la regulación hídrica en ríos que descienden, proporcionándolos un flujo base sostenido. La relevancia de dicho almacenamiento radica en que mantiene el flujo de agua durante periodos sin precipitación o escurrimiento directo (**Guzmán, 2015**). Las altitudes entre las que se encuentra este ecosistema varían, sin embargo en el Ecuador se usan comúnmente la altitud de 3.500 m como límite inferior, pero las condiciones geológicas, climáticas y antrópicas hacen que este límite varíe mucho y que se encuentren a veces páramos desde los 3.200 m, especialmente en el sur del país, o bosques cerrados hasta por los 4.000 m. Estos rangos de alturas generan una gran variación espacial en la precipitación y la temperatura (**Céleri et al., 2007**). En nuestro país el páramo cubre alrededor de 1.250.000 ha, es decir aproximadamente un 6% del territorio nacional (**Medina y Mena, 2001**). El clima durante el año es estable, sin embargo se presenta una diferencia entre el día y la noche, lo que se puede resumir en “verano todos los días, invierno todas las noches” (**Hedberg y Hedberg, 1979**). Se caracteriza además por un clima lluvioso y frío con baja evapotranspiración (**Guzmán, 2015**). Una precipitación media principalmente en forma de lluvia es de unos 1.400 mm/año y posee una radiación solar casi constante todo el año debido a su proximidad al ecuador (**Buytaert et al., 2006a**).

Los páramos han sufrido muchos cambios a lo largo de los años, debido a diferentes impactos causados por el hombre. El problema se presenta por el mal uso de los recursos que el páramo posee, como sus suelos y el agua. Una afección a los suelos implica una afección directa en el agua, ya que altera el ciclo hidrológico, en cuanto a la recarga o almacenamiento se refiere, causando alteraciones en caudales de pequeñas y grandes cuencas hídricas. Se han realizado estudios hidrogeológicos, basados en análisis de caudales base a través de diferentes métodos y realizando una comparación de la recarga que posee cada cuenca estudiada. Este tipo de estudio lo realizó **Guzmán (2015)**, analizando dos cuencas formadas en parte por páramos andinos, las cuencas de Yanuncay y Tarqui. Se han llevado a cabo además extensos estudios sobre las propiedades de los suelos, condiciones meteorológicas, el escurrimiento y el uso del suelo (**Buytaert et al., 2004; Buytaert et al., 2006a; Roa – García et al., 2011; Crespo et al., 2011**) la mayoría en la parte sur del Ecuador.

Un análisis de flujo base, serviría como aproximación de la recarga y referencia del almacenamiento que actualmente posee el páramo; así seleccionando diferentes microcuencas con características de temperatura y altura similares, se obtienen valores de recarga a través de diferentes métodos, se comparan los resultados y se identifican diferencias que se puedan relacionar al mayor o menor grado de afección. El presente trabajo analiza el flujo base de tres microcuencas (Calluancay, Zhuruca y Quinuahuaycu), a través de tres métodos (filtros digitales; regresión no lineal y filtros



físicos), con el uso de una serie de datos hidrometeorológicos de los años 2011 y 2012. Con este análisis lo que se busca es encontrar cuál de estas tres microcuencas posee una mayor recarga e identificar a la de menor recarga. Este trabajo también tiene un enfoque sobre las posibles afecciones que implicaría colocar una industria minera en esta zona, en cuanto a la recarga se refiere.

Se lleva a cabo este enfoque sobre la industria minera, debido a la presencia de un proyecto minero en el área de Quimsacocha donde se encuentran las tres microcuencas a estudiar, este proyecto ahora llamado Loma Larga, es un proyecto minero que busca explotar un yacimiento de oro a través de una mina a nivel subterráneo por parte del concesionario INV Metals (INV Minerales Ecuador S.A.), y se encuentra en una fase de exploración avanzada.

Lo que se espera con este trabajo es obtener una mejor comprensión de las características del flujo base, como el almacenamiento y la recarga, tomando en cuenta la cobertura vegetal, la altura y la temperatura en las microcuencas andinas, y con esto se pueda llevar a cabo una mejor evaluación de los recursos hídricos para las diferentes actividades, incluidas las mineras, con miras a fortalecer acciones de manejo.



1. Descripción del área de estudio

1.1 El Páramo

Los páramos sudamericanos se encuentran desde la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia y la Cordillera de Mérida en Venezuela, hasta la depresión de Huacabamba en Perú (aproximadamente entre los 11° de latitud Norte y los 8° de latitud sur), constituyen un componente importante de la biodiversidad de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú (**Balslev y Luteyn, 1992; Luteyn, 1999; Hofstede et al., 2003**). El páramo consiste en planicies y valles accidentados de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas.

Debido a la baja densidad aparente y a la estructura abierta y porosa de los suelos del páramo, tienen una conductividad hidráulica alta y una capacidad de retención de agua muy alta. Cuando están saturados, los contenidos de agua pueden exceder 0,95 g cm⁻³, disminuyendo hasta cerca de 0,3 g cm⁻³ a -1.500 kPa (**Buytaert et al., 2006a**). Por lo que se conoce a los páramos como “esponjas”.

Algunos páramos, debido a la poca presencia humana, posee una calidad de agua excelente, y los ríos que descienden desde el páramo tienen un alto y sostenido flujo base. Por lo que la mayoría de grandes ciudades en el norte de los Andes como por ejemplo Bogotá y Quito, dependen del páramo para su suministro de agua.

En los últimos 1.500 años los seres humanos hemos influenciado sobre los páramos de nuestro país, dando lugar a un mosaico de diferentes estados desde bien conservado (por lo general los más altos y más desolados) hasta muy degradado (debido a la ganadería, agricultura, quema de vegetación, reforestación con especies exóticas, deportes extremos, atracciones turísticas, cambio de clima, etc.), dando lugar a una menor retención de agua (**Placlet, 2013**). Estas actividades podrían alterar significativamente el comportamiento hidrológico del páramo, y de este modo limitar la función de suministro de agua.

1.2 Páramo Ecuatoriano

En Ecuador, los páramos abarcan aproximadamente 1.250.000 ha, o casi el 6% del área nacional total. En términos relativos, Ecuador es el país con más páramo en proporción a su área total (**Vásconez y Hofstede, 2006**). En el Ecuador los páramos forman parte de una notable biodiversidad a escala de ecosistemas gracias a tres factores: la situación ecuatorial, la presencia de la cordillera de los Andes y otras sierras menores, la existencia de una fuente perhúmeda amazónica y de varias corrientes marinas frías y cálidas frente a las costas (**Mena y Hofstede, 2006**).

1.2.1 Vegetación y suelos

El páramo ecuatoriano está constituido por una vegetación natural herbácea de carácter permanente conformada mayoritariamente por gramíneas como la paja, debido a lo cual deriva su denominación común de “pajonal”, festuca y calamagrostis; otras formas de vida vegetal arosetada y en almohadilla son típicas y aparecen como



adaptaciones a la altura, y adoptan funciones de almacenamiento de agua en grandes cantidades, el musgo del género es un reservorio capaz de retener en sus tejidos hasta 40 veces su peso seco con agua (**Vargas y Rivera, 1991**). Debido a su alta elevación, se produce principalmente en parches aislados y fragmentados, promoviendo alta variedad de especies vegetales y animales, y también endemismo alto. En algunas zonas, existe un claro gradiente de vegetación altitudinal y se puede hacer una distinción entre sub - páramo, páramo propio y súper - páramo (**Buytaert et al., 2006a, Váscónez y Hofstede, 2006**). Se diferencian en el páramo tres categorías (**Acosta, 1984**):

- Páramo inferior, zona de pajonal entre 3.200 y 4.000 msnm, con una tendencia a subir del límite inferior por intervención de la presión humana.
- Páramo medio, entre 4.000 y 4.500 msnm.
- Páramo superior sobre los 4.500 msnm.

Teniéndose una mayor importancia el páramo inferior y medio.

En los páramos de los Andes albergan alrededor de 5.000 especies de plantas diferentes (**Buytaert et al., 2006a**). De estas especies, alrededor del 60% son endémicas, adaptadas a condiciones específicas, como la baja presión atmosférica, la radiación intensa y los efectos del viento. La vegetación generalmente se desarrolla en los depósitos de cenizas volcánicas del Holoceno. Estas son ampliamente expuestas en la mitad norte del Ecuador, pero también en el sur existen importantes áreas de páramo (**Placlet, 2013**).

Los páramos del Ecuador no son homogéneos, ya que muchos son los factores diversos que influyen sobre la vegetación como los suelos, factores meteorológicos (temperatura, precipitación, evapotranspiración, y los vientos), los cuales producen una gran gama de microclimas y zonas de vida (**Camacho, 2013**).

Los suelos de los páramos del Ecuador se han desarrollado sobre depósitos piroclásticos resultantes de las erupciones de los numerosos edificios volcánicos de la llamada “avenida de los volcanes” (**Quantín y Zebrowski, 1997**). Se trata en general de andosoles y histosoles, pero su morfología y propiedades varían considerablemente según los principales factores de la pedogénesis (creación del suelo), como la edad, la naturaleza, la composición química de los materiales y las condiciones climáticas. Presentan altas capacidades de retención de agua (del 60 al 200%) y a menudo importantes acumulaciones de materia orgánica, como consecuencia del clima frío y húmedo, así como la menor presión atmosférica con menores concentraciones de oxígeno (**Podwojewski, 1999**). Estas acumulaciones de materia orgánica generan grandes cantidades de carbono orgánico del suelo. Estos suelos contienen alrededor de 100 g/kg de carbono orgánico, llegando a contener hasta un 40% de materia orgánica (**Buytaert et al., 2006a**), y hasta un 43% según (**Harden, 2006**). Esta acumulación se ve reforzada por la formación de complejos organometálicos, que son altamente resistentes a la degradación microbiana. El aluminio y el hierro necesarios para estos complejos son suministrados por la descomposición de las cenizas volcánicas y la roca madre presente.

Los suelos del páramo son bastante homogéneos a pesar de la compleja geología y topografía del subsuelo. Además de los anteriores suelos mencionados hay

la presencia de algunos umbrisoles (*Buytaert et al., 2006a*) y algunos regosoles en las partes más empinadas (*De Bièvre et al., 2012*).

La alta humedad presente junto con la alta porosidad (densidad aparente de $0,26 \text{ g/cm}^3$ (*Harden, 2006*) resultan en una alta capacidad de almacenamiento de agua de 80-90% de saturación (*Iñiguez, 2003*). Este efecto es claro cuando se comparan las curvas de retención de agua de los andosoles con las de los suelos más comunes como se puede ver en el siguiente gráfico.

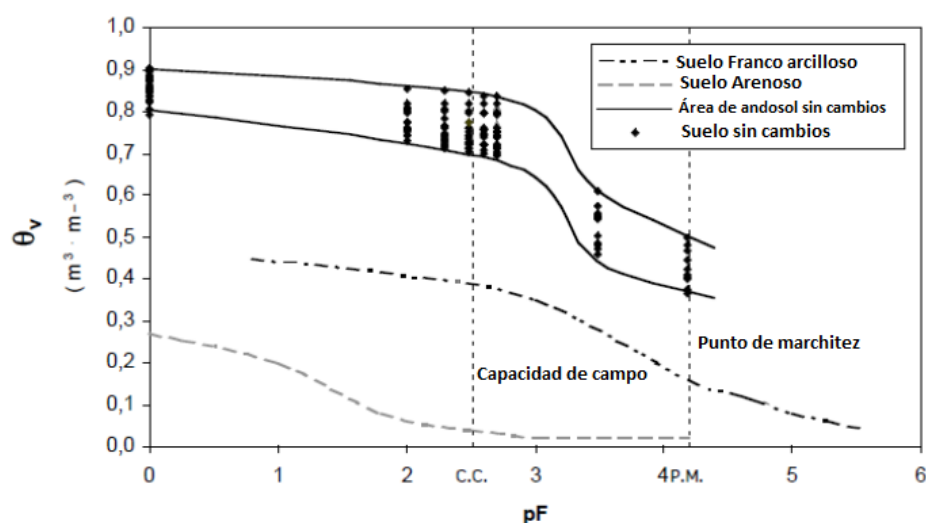


Gráfico 1: Curvas de retención de agua de diferentes tipos de suelo (*Iñiguez, 2003*)

La tabla 1, muestra los tipos de suelo y el tipo de vegetación presente en cada microcuenca a realizar el análisis de flujo base. En cada microcuenca estudiada hay la presencia de especies tradicionales y endémicas principalmente, sin embargo en la cuenca de Zhurucay se puede encontrar plantaciones de pinos, que fueron plantados en los años ochenta por el gobierno en un gran proyecto de reforestación.

Tabla 1: Comparación de tipo de suelos y vegetación de las tres microcuencas (*PROMAS, 2009*).

Microcuenca	Calluancay	Zhurucay	Quinuahuaycu
Área [km2]	4.39	1.34	5.01
Melanic Aluandic Andosol (Dystric) [%]	44	49	45
Leptic Aluandic Andosol (Dystric) [%]	26	23	17
Histic Fibric Andosol (Dystric) [%]	8	6	5
Hydric Aluandic Andosol (Dystric) [%]	2	3	3
Melanic Aluandic Leptosol (Dystric) [%]	4	2	5
Rheic Fibric Histosol (Eutric) [%]	12	15	19
Andic Cambisol (Dystric) [%]	3	3	5
Vegetación			
pj= pajonal	pj - ch (52%)		pj - ch (50%)



ch= chaparro	pj (23%)	pj (71%)	pj - al - ch (20%)
al= almohadillas	pj - al (14%)	al - pj (26%)	pj (18%)
pin= pinus	al - pj - ch (11%)	pin (2%)	al (8%)

1.2.2 Hidrología y características hidráulicas de los suelos

El páramo en sí funciona como un medio de regulación de los flujos hídricos, por la importante retención de agua de sus suelos, funcionando como un almacenamiento en periodo húmedo y liberación progresiva en periodo seco. El alto poder de infiltración de tales suelos controla además la intensidad de crecidas. El funcionamiento hídrico de los páramos desempeña un papel importante tanto para el abastecimiento doméstico como el abastecimiento de las centrales hidroeléctricas construidas frecuentemente en conexión con este medio (**Camacho, 2013**).

La producción de agua de un sistema páramo está entre 600 y 1.000 mm/año. Esto representa alrededor de 2/3 de la precipitación anual, que oscila entre 700 a 3.000 mm (**Buytaert et al., 2006a**). Estas precipitaciones son hasta un 16% más altas que en el valle interandino debido a efectos orográficos (**Buytaert y Beven, 2011**). Sin embargo, la aportación real de agua en el sistema hidrológico es probablemente mayor en comparación con la precipitación medida, ya que se desconoce la cantidad de agua producida por la niebla y el rocío que son interceptadas por la vegetación. Por lo general se presentan en el páramo, eventos pluviométricos que tienen una alta frecuencia y una baja intensidad, existiendo una variabilidad espacial de la precipitación además, debido a los efectos orográficos y a los fuertes vientos. El análisis de los datos de precipitación, revelan que la variabilidad estacional en el páramo es extremadamente baja (**Buytaert et al., 2006c**). La lluvia casi constante es el mayor contribuyente al flujo de caudal base que se mantiene durante todo el año, ya que las contribuciones de amortiguación de las aguas subterráneas profundas son limitadas o incluso inexistentes (**Buytaert y Beven, 2011**).

La evapotranspiración en el páramo es baja y oscila entre 0,8 y 1,5 mm/día (**De Bièvre et al., 2012**).

La capacidad de infiltración del suelo y la conductividad hidráulica saturada son mayores que la intensidad de lluvia, por lo tanto la precipitación se infiltra en superficies vegetadas. Se obtuvieron intensidades de lluvia a través de observaciones de 39,60 y 15,70 mm/h para eventos de 15 y 60 minutos, comparando con la conductividad hidráulica saturada de los suelos que está en un rango de 10 a 60 mm/h (**Céleri y Feyen, 2009**), además de encontrar valores de conductividad hidráulica de 11,70 mm/h (**Buytaert et al., 2005**).

La alta retención de agua y el alto flujo de caudal base contrastan con la baja conductividad hidráulica insaturada de los suelos. Esto podría explicarse en primer lugar, por la existencia de una densa red de drenaje natural que resulta en una pequeña distancia media de drenaje, lo que compensaría la baja conductividad hidráulica insaturada. En segundo lugar, la regulación del agua podría estar dominada por las depresiones locales, donde las condiciones saturadas y el estancamiento se producen casi continuamente (**Buytaert et al., 2005**). La combinación de bajas

intensidades de lluvia, alta capacidad de infiltración y abundante vegetación (intercepción) conduce a la ausencia de flujo Hortoniano (escorrentía superficial), por lo que la escorrentía es causada por una combinación de flujo subterráneo lateral y exceso de saturación.

1.2.3 Clima

El páramo ecuatoriano, el sector de Quimsacocha, se caracteriza por tener variaciones de temperatura media entre 2° y 12° C (**PROMAS, 2015**). La variación limitada de la temperatura se combina con grandes fluctuaciones diarias que son típicas para el microclima de los Andes, causadas por las altas intensidades de radiación a alta altitud. En el gráfico 2 se muestra un perfil de temperatura mensual, con datos proporcionados por el PROMAS. El microclima está influenciado por la topografía y exposición (**Vásconez y Hofstede, 2006**).

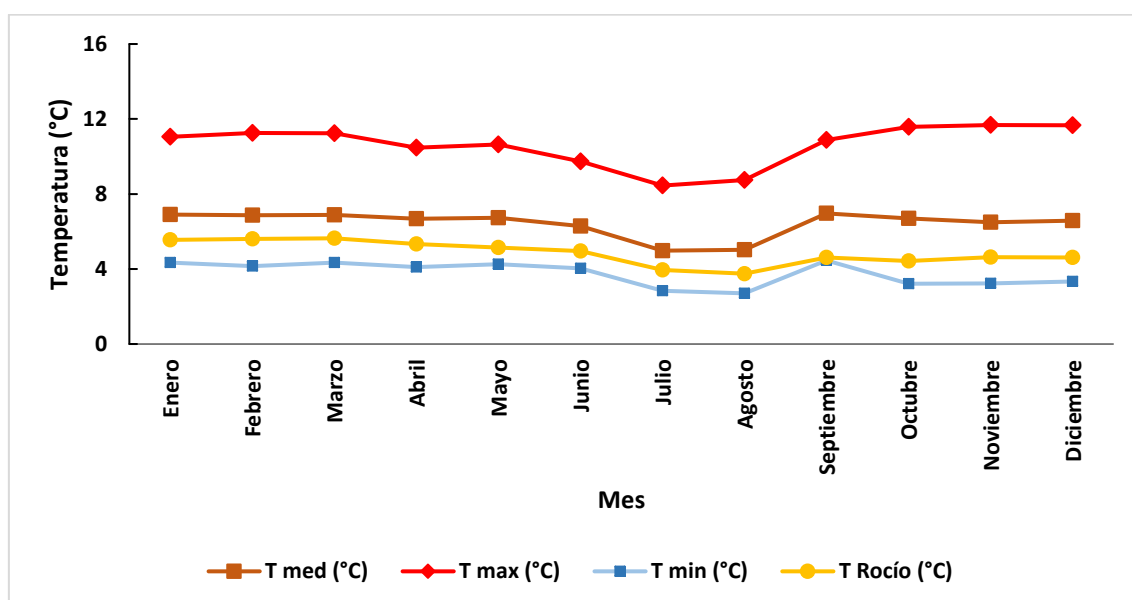


Gráfico 2: Régimen anual de temperatura en Quimsacocha, datos desde el año 2006 al 2013.

La precipitación anual alcanza valores entre 1.060 a 1.600 mm. El patrón de precipitaciones está en gran parte vinculado al impacto de la Amazonía y/o el Océano Pacífico. En el gráfico 3, se muestra la variación a lo largo del año a través de una serie de datos que va desde el año 2010 al año 2013, en el cual se puede observar que hay un periodo de mayor precipitación comprendido desde Febrero hasta Abril, disminuyendo en los meses de Mayo a Julio y se observa precipitaciones bajas desde Agosto hasta Octubre, aumentando nuevamente en los meses de Noviembre y Diciembre.

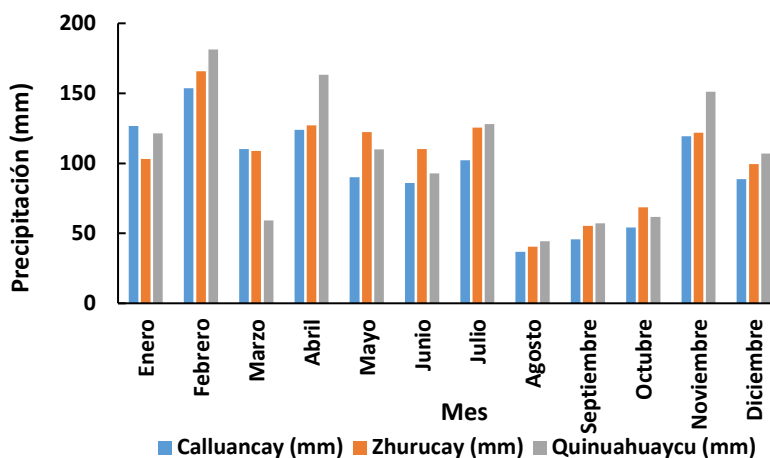


Gráfico 3: Régimen anual de precipitaciones en las tres microcuencas del área de Quimsacocha desde el año 2010 al 2013.

1.3 Área de Estudio

El páramo de Quimsacocha se ubica en la Cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos; conformado por valles y llanuras entre los 2.760 y 3.960 m.s.n.m. Gran parte de su formación es de origen volcánico, atribuida al mioceno tardío, en el lugar se presentan la formación Quimsacocha, la formación Tarqui que a su vez se sobreponen la formación Turi (**Bonilla, 2013**). La formación Tarqui es una formación del Mioceno Tardío hasta Plió – Pleistoceno está formada por rocas piroclásticas ácidas, pero ocasionalmente se observan lavas, además contiene brechas riolíticas y brechas andesíticas volcánicas, flujos piroclásticos, ignimbritas y tobas aerotransportadas; y la formación Turi es un conglomerado que forma escarpas, sobre la que viene una sucesión de capas guijarrosas, limosas y arenosas (**Erazo, 1957**). La formación volcánica Quimsacocha es considerada como una de las más recientes del Sur del Ecuador y la zona, al parecer, se encuentra en el Cinturón Garamín franja con depósitos de oro que se extiende 80 kilómetros hasta la zona históricamente minera de Zaruma (**Bonilla, 2013**).

Las cenizas volcánicas del Volcán Quimsacocha, nutrieron al páramo de una tierra fértil debido a que contienen una gran cantidad de fósforo y potasio; de la misma manera el páramo se formó por almohadillas, pajonales y bosque montano alto (Bosque de montaña). Estas formaciones generan que el territorio sea una especie de esponja que filtra agua, entre 1.060 y 1.600 mm anuales, de alta pluviosidad. Esto implica la presencia de lluvia durante todo el año, absorbida por la vegetación del lugar (**Bonilla, 2013**). Sin embargo además de la lluvia la zona recepta abundante neblina, que aumenta la humedad del lugar volviéndolo pantanoso.

El nombre de Quimsacocha, es un nombre quichua que significa 'tres lagos' y comprende ocho microcuencas de las cuales serán objeto de estudio en este trabajo tres de ellas que son: Calluancay, Quinuahuaycu y Zhurucay, que cubren respectivamente 4.39 km², 5.01 km² y 1.34 km² (Gráfico 5).

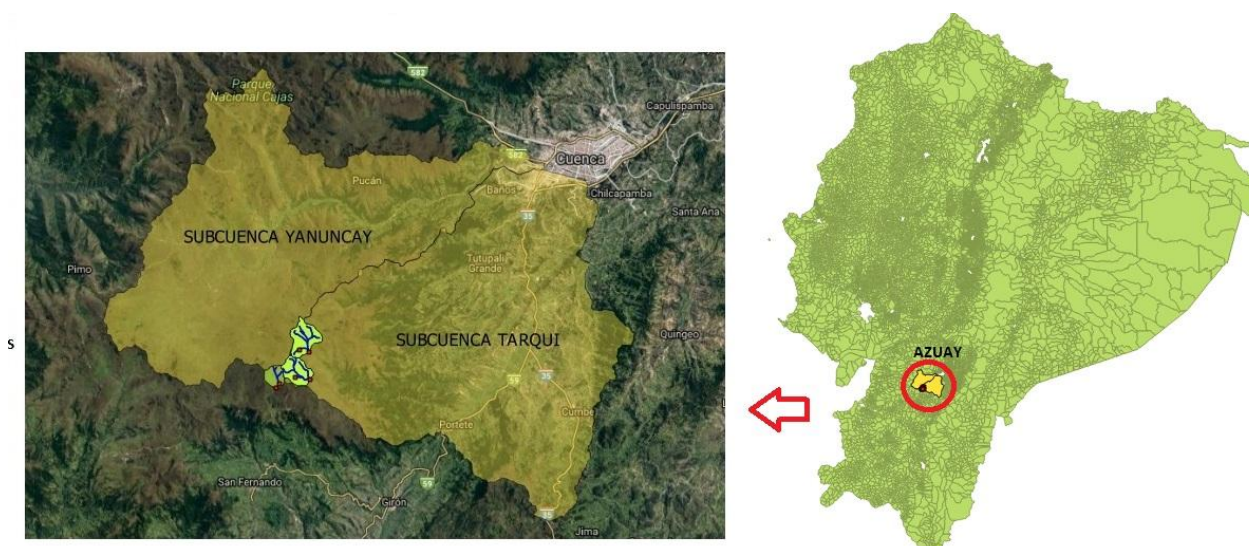


Gráfico 4: Microcuencas ubicadas en el mapa con las Subcuencas de Tarqui y Yanuncay. Ubicación en el Ecuador.



Gráfico 5: Microcuencas de Quimsacocha, Calluancay, Quinuahuaycu y Zhurucay.

Esta zona presenta un fenómeno poco común en páramos ecuatorianos, debido a que tiene una serie de cuencas hídricas hacia el océano Pacífico a través del río Jubones, y otro grupo de cuencas que van hacia el Océano Atlántico a través del



Paute. Así mismo, la zona capta precipitaciones que llegan desde el Pacífico y la Amazonía. La zona además delimita dos hoyas que son, la primera al interior del Callejón Interandino: la hoya donde está la Ciudad de Cuenca; y la hoya de Girón, que se separa de la primera por el nudo del Portete. Los valles alrededor del páramo gozan de tierra fértil gracias al origen volcánico, y disponen de abundante acceso al agua, sea por lluvia, agua subterránea o las quebradas que brotan del páramo (**Bonilla, 2013**).

1.3.1 Modelos Perceptivos

Con el objetivo de ilustrar las diferentes condiciones físicas que pueden influenciar en los patrones de recarga y flujo en los suelos se realizan dos modelos perceptuales (A y B) basándonos en los estudios realizados por **Guzmán (2015)**, a partir de análisis de datos y estudios previos, estudiando así los posibles caminos en los que se desplazan las aguas superficiales y subterráneas a través de estas tres microcuencas estudiadas.

Se plantea la hipótesis de que la respuesta hidrológica de las tres microcuencas corresponde a la del gráfico 6, mostrado a continuación. Se piensa que la respuesta hidrológica del páramo está compuesta por una combinación de flujo subterráneo lateral superficial y superficial.

La recarga profunda a las aguas subterráneas en las áreas de páramo es menos probable debido al lecho impermeable a poca profundidad formado por los suelos compactados producto del periodo glaciario, así la respuesta lenta es causada por la combinación de una alta capacidad de retención de agua del suelo y una baja evapotranspiración de la vegetación (**Guzmán, 2015**).

El modelo A, muestra un esquema considerando condiciones naturales sin intervención antrópica, el esquema B presenta un esquema considerando excavación subterránea en la capa impermeable debajo del Androsol. El esquema A muestra a las variables de precipitación, evapotranspiración, escorrentía, infiltración y almacenamiento en condiciones naturales y el esquema B presenta las variables afectadas debido a la presencia de grietas que permiten el paso del agua hacia el lugar de perforación subterráneo, disminuyendo el valor del almacenamiento. Es decir, la intervención daría lugar al paso de un esquema A a un esquema B.

El esquema B presenta la baja recarga como producto de grietas que se forman durante la perforación, causando canales preferenciales de flujo que al ser captado en las galeras o túneles tienen un efecto de drenaje de los páramos o humedales, causando variaciones en su almacenamiento.

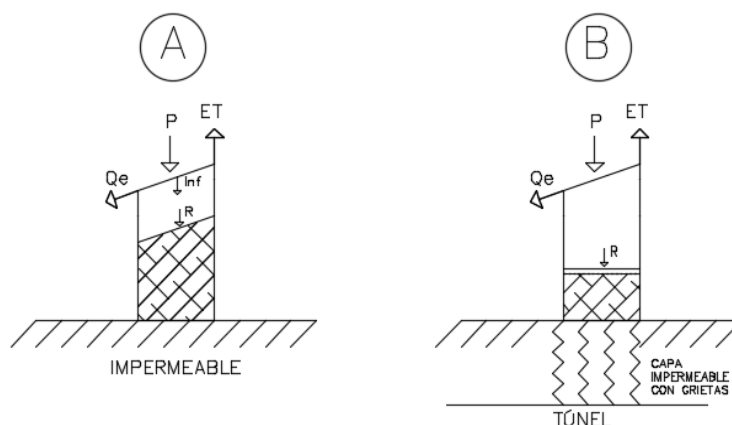


Gráfico 6: Esquema de variables hidrológicas. Esquema A de condiciones normales del páramo y esquema B con intervención antrópica.

1.3.2 Planes Mineros en el páramo de Quimsacocha.

Los planes mineros en esta zona están a cargo de la empresa minera INV Minerales Ecuador S.A. En la actualidad se lleva a cabo la fase de exploración avanzada. La extracción será subterránea y la fase de liberalización tendrá lugar cerca pero fuera de la zona protegida del páramo, además la empresa plantea que la fase de separación, utilizando productos químicos tendrá lugar cerca de la costa ecuatoriana en un paisaje menos vulnerable. De los emplazamientos de molinos se depositarán 214.000 t/año de residuos sólidos y 72 km³/año de aguas residuales, se utilizarán 627.000 t/año de residuos sólidos y 209 km³/año de agua residual para el relleno de la mina.

Este proyecto minero es considerado como un proyecto estratégico con una inversión para los próximos 20 años estimada en 372 millones de dólares para el desarrollo de la mina y 432 millones de dólares para gastos operativos, dando un total de 804 millones de dólares, según el Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero. Con este proyecto se estima la generación de 1.000 empleos directos y 1.500 empleos indirectos en la fase de construcción, mientras que en la fase de operación, se estima una generación de 526 empleos directos y 1.520 empleos indirectos, sin embargo cabe recalcar que la fase de construcción es un periodo de tiempo muy corto (1 a 3 años), en comparación con la fase de operación (de 10 a 20 años), por lo tanto esta última fase es aquella que requiere generalmente una mano de obra más calificada, generando una tasa de empleo local más baja (**Sacher y Acosta, 2012**).

1.4 Definición del problema

La falta de datos y de estudios del páramo sobre variables hidrológicas, hidrogeológicas y uso de suelo en lo que respecta a la implementación de obras subterráneas, da lugar a que no se sepa con exactitud la afección generada. Una aproximación del grado de afección presente en cada microcuenca se puede cuantificar a través del análisis del flujo base, obteniendo la recarga y el almacenamiento de agua en el suelo, proporcionando una idea del posible grado de afección con una actividad minera.



1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Principal

Estudiar, analizar y determinar los valores de flujo base por medio de los diferentes métodos y en las diferentes microcuencas y así dar a conocer los posibles daños que puedan llegar a ocurrir en el almacenamiento de agua en los suelos y el cambio en el ciclo hidrológico natural (recarga y regulación) del páramo con la presencia de una actividad minera.

1.5.2 Objetivos Secundarios

- Recolectar y analizar datos hidrológicos de la zona.
- Realizar un análisis a partir de la evapotranspiración real.
- Realizar un análisis a partir del balance hídrico.
- Realizar el análisis para obtención del flujo base en las tres microcuencas con los métodos de regresión no lineal, filtros digitales y filtros físicos.
- Realizar una comparación de los resultados obtenidos a través de los métodos con los datos hidrológicos de la zona.
- Realizar una comparación de los métodos empleados en cada microcuenca.
- Realizar un comentario del posible grado de afección por parte de la minería en la recarga con guía en los resultados obtenidos en condiciones actuales.

1.6 Estructura del Trabajo de Titulación.

El Trabajo de Titulación está enfocado en el estudio del flujo base de tres microcuencas de Quimsacocha y posee los siguientes capítulos:

Capítulo 1: En este capítulo se parte de la definición de páramo seguido de la literatura del páramo Ecuatoriano, dando a conocer las principales características que este posee en cuanto a su clima, vegetación y suelos, hidrología y características hidráulicas del suelo. A continuación se describe el área de estudio, ampliando sus características de páramo al describir su geología, modelos de condiciones físicas y el plan minero que se lleva a cabo en esta zona. Se concluye este capítulo con los objetivos principales y secundarios, seguido de la estructura general del Trabajo de Titulación realizado.

Capítulo 2: En este capítulo se desarrollará una descripción de los páramos Andinos, además se desarrollará una descripción de áreas de minería en y alrededor de los Andes que serán comparadas a través del análisis de sus impactos ambientales y socioeconómicos, para así tener un pronóstico de los posibles acontecimientos a ocurrir en nuestra área de estudio.

Capítulo 3: En el capítulo se analizan los materiales y métodos utilizados, centrándose en el área de estudio de Quimsacocha y sus características hidrológicas.

Capítulo 4: Se presenta los resultados y la discusión, se elaboran e interpretan los resultados obtenidos del análisis del capítulo cuarto.



Capítulo 5: Se presenta las principales conclusiones y recomendaciones, que se centra en resaltar los hallazgos más importantes de la investigación y establece soluciones y sugerencias importantes para futuras investigaciones.

2. Prácticas mineras en los Andes

Este capítulo se enfoca en dos aspectos principales, el primero sobre la minería llevada a cabo en los Andes; y el segundo en el que se realiza un estudio comparativo entre 3 diferentes minerías a gran escala establecidas en páramos de diferentes países, que a pesar de no ser minerías subterráneas como el caso del proyecto Loma Larga, sirven como referencia de la posible afección a la regulación del agua y usos del suelo con una actividad minera.

2.1 Minería en los Andes

La minería establecida en los páramos andinos ha generado y genera impactos predecibles y de largo plazo, sin embargo, un conocimiento claro sobre dichos impactos puede ayudar a tener un buen plan de manejo y una estrategia que permita reducirlos (**Corredor, 2012**).

La modificación de la topografía y el paisaje; alteración del carácter físico, físico – químico y químico en el suelo y subsuelo; infertilidad, paso de contaminantes a través del agua; generación de taludes de suave pendiente que modifican ostensiblemente las formas y las pendientes naturales de las laderas por donde discurren cauces menores; cambio en el comportamiento mecánico del suelo y en la formación y acumulación de materia orgánica y el intercambio de gases con la atmósfera; producción de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos que de forma directa o indirecta recibirá el suelo; alteración de la capacidad de regulación hídrica y produce pérdida irreversible de la función del soporte físico de ecosistemas; disminución de caudales y alteración del sistema de drenaje natural; alteración del nivel freático y de los ciclos hidrológicos; desviación e interrupción de caudales por disposición de estériles y afección de los hábitats naturales de la fauna y la flora, entre otros, son las principales afecciones que sufren los páramos ante la presencia de la actividad minera (**Corredor, 2012**).

2.2 Descripción de las minas en los Andes

El objetivo en esta parte del trabajo, es el de establecer una comparación y realizar una discusión sobre los problemas de la minería, a través de la descripción de tres minas de metales preciosos, encontrando así algunas conclusiones sobre la relación entre las operaciones mineras y los impactos causados por las mismas.

La tabla 2 muestra una comparación técnica de las minas mencionadas anteriormente:

Tabla 2: Comparación técnica de las minas estudiadas.

Característica/Minería	Kori Kollo	Cerro de Pasco	Yanacocha
------------------------	------------	----------------	-----------



Ubicación	Oruro (Bolivia)	Cerro de Pasco (Perú)	Cajamarca (Perú)
Tamaño de la mina (s)	±70 km ²	±5 km ²	±160 km ²
Toneladas de material extraídos por día	20.000	8.000	500,000.00 - 600,000.00
Ingresos	\$ 136 millones (2009)	\$ 185 millones (2009)	\$ 881.5 millones (2009)
Distancia a las comunidades	45 km de Oruro	En el centro de Cerro de Pasco	25 km de Cajamarca
Empleo	400-1.000	±4.000	±2.300 personal y 6.700 contratista
Reservas y recursos de metales (toneladas de oro extraído)	96,38	123.9000.000	60.000.000

2.2.1 Mina Kori Kollo, Oruro, Bolivia

La mina de Kori Kollo, es una mina explotadora de oro y plata que está situada cerca de los 3.710 metros sobre el nivel del mar en el altiplano boliviano, en una meseta entre dos cordilleras de los Andes. La mina es parte del departamento de Oruro y está localizada a 45 kilómetros al noroeste de la ciudad de Oruro y a cerca de 160 kilómetros al sureste de la capital de La Paz. La mina está situada en el río Desaguadero, que es suministrado por el Lago Titicaca y fluye hacia los lagos Poopó y Uru Uru. Los suelos se caracterizan por una acumulación de sales e infiltración lenta que conduce a la mayoría de los entisoles y aridisoles (*Montoya y Mendieta, 2006*).

La mina se encuentra actualmente en fase de cierre y rehabilitación. Los problemas que se presentan son: salinización, infiltración de cianuro en suelos y agua (proceso de residuos), movilización de metales pesados (relaves) y sedimentación de ríos (desplazamientos de suelo) (*Placlet, 2013*).

El gráfico 7 muestra esta mina, cuya extracción es a cielo abierto:



Gráfico 7: Mina de Kori Kollo (www.la-razon.com)

2.2.2 Mina de volcán, Cerro de Pasco, Perú

El Cerro de Pasco se localiza al este de la cordillera occidental en los Andes a 4.338 metros sobre el nivel del mar. La primera empresa norteamericana Cerro de Pasco Copper Corporation llegó en 1900. Este fue el inicio de la degradación del lago contiguo de Quiulacocha por el vertido de residuos mineros, que inició la desaparición de aves y roedores, y la muerte de especies acuáticas como la trucha y anfibios como las ranas. Esto duró hasta 1976. Después de la nacionalización por el gobierno militar, surge Centromín Perú S.A., con una gran mina a cielo abierto que deja la ciudad rodeada de montones de residuos. En septiembre de 1999 la empresa Minera Volcan Cia., adquirió la unidad económica productiva de Paragsha, explotando hasta el presente el pozo abierto Raúl Rojas, que se está expandiendo a costa de las casas de la ciudad. En América del Sur, la mina es conocida como el mayor productor de zinc, plomo y plata. En todo el mundo ocupa el cuarto lugar en la producción de zinc (**Placlet, 2013**).

Los minerales se extraen a través de la explotación a cielo abierto y la explotación subterránea. Para la extracción de plata, la empresa Minera Volcan Cia., utiliza el proceso de lixiviación donde se utiliza cianuro. Para el zinc y el plomo, se utiliza la técnica de flotación. En el Cerro de Pasco la infraestructura está rezagada y una gran cantidad de residuos terminan en los lagos o se lixivian en las aguas subterráneas. El gráfico 8 muestra el Cerro de Pasco y el gran hoyo producto de la minería.



Gráfico 8: Cerro de Pasco, gran hoyo producto de la minería (www.editorialvirtual-mapp.com).

2.2.3 Mina de Yanacocha, Cajamarca, Perú

Yanacocha es una expresión quechua que quiere decir Laguna Negra, que era el nombre de una formación acuífera de una superficie de 3,5 hectáreas. Ubicada en el corazón del proyecto minero. La laguna ya no existe, de ella solo quedaba el nombre para describir el lugar a 45 kilómetros de la ciudad de Cajamarca y a 800 desde la capital peruana, Lima, en el que se descubrió en 1982 una valiosa veta de oro y ocho años después se iniciaron los estudios de factibilidad para comenzar los trabajos (**Wiener y Torres, 2014**).

Yanacocha se caracteriza por ser una región de páramo con una alta densidad de lagos y comprende una superficie total de 160 km² (**Palacios-Berrios, 2006**).

La actividad de Yanacocha se extiende sobre cuatro cuencas hidrográficas: Quebrada Honda, Río Chonta, Río Porcón y Río Rejo, a una altura entre los 3.500 y 4.100 metros sobre el nivel del mar. La superficie territorial ocupada alcanza las 179.478 hectáreas, que corresponden a 259 concesiones mineras acumuladas (**Wiener y Torres, 2014**).

Entre los principales problemas relacionados con las actividades mineras, se tiene la desaparición de los canales de riego, la aparición de mercurio en el sistema de agua potable de Cajamarca, dos derrames de petróleo en el sector Pampa Larga, la extinción de peces y anfibios y el derrame de mercurio en Choropampa en el 2000 (**Deza, 2002**).

El gráfico 9 muestra la minería de Yanacocha, cuya explotación se realiza a cielo abierto:



Gráfico 9: Minería de Yanacocha (www.actualidadambiental.ep).

2.3 Estudios de los problemas relacionados a la degradación ambiental

Los impactos producidos por la minería, en la mayoría de los casos afectan de tal manera que sus efectos son irreversibles, producto de la mala gestión ambiental y mal enfoque en la sostenibilidad tanto del bienestar social como económico de las comunidades cercanas a esta actividad. Sus principales impactos se presentan en la contaminación del agua, el suelo y el aire. En la presente parte se discutirá en primer lugar las causas de la contaminación, seguido de un resumen y discusión de los datos sobre la calidad del agua y suelo.

2.3.1 Causas de la contaminación

Para poder tener un mejor entendimiento sobre los problemas que acarrea la actividad minera, primero se deben estudiar las causas subyacentes relacionadas principalmente con una gestión ineficiente y/o una infraestructura inadecuada. La edad de las minas se considera uno de los agravantes, considerando la tecnología constructiva aplicada en su tiempo, conjuntamente con la falta de conocimiento y legislación sobre el impacto ambiental. Lamentablemente en las distintas operaciones mineras no se han implementado las debidas medidas de prevención, mitigación y restauración ambiental, lo que conlleva a una degradación ambiental muy notable.

La tabla 3 muestra la información obtenida del Seminario Internacional de Seguridad Minera en Perú organizado por la ONG Belga Catapa y consultas



bibliográficas (*Appleton et al., 2001; Montoya y Mendieta, 2006, Compañía minera Yanacocha, n.d., Volcán Compañía minera, 2015; Beltrán y Eguiguren, 2010*).

Tabla 3: Comparación de la infraestructura y los componentes de gestión.

Minería/Característica	Kori Kollo	Cerro de Pasco	Yanacocha
Tipo de minería	Pozo abierto	Pozo abierto + Subterráneo	Pozo Abierto
Productos químicos usados para la extracción	Cianuro	Cianuro	Cianuro
Consumo de Agua	±22.040 m ³ / d	±43.216 m ³ / d	±4.493 m ³ / d (máx. 77.760 m ³ / d)
Gestión de Relaves	* Diques hechos con desechos para contener relaves. * Algunos relaves se depositaron en los ríos y se volvieron a extraer. * Poco uso de membranas de plástico	* Lago Quiulacocha lleno de relaves. * No se usaron membranas.	* Hoyos están cubiertos con geomembranas. * Es probable que se produzcan grietas.
Eliminación de aguas residuales	8.000 m ³ / día de aguas residuales, acumulándose en estanques de evaporación.	105.908 m ³ / día, Presa de relaves.	Reciclado o almacenado en estanques de evaporación.
Área perturbada	> 7.000 ha	Directamente: > 226 ha (ciudad), Indirectamente: ≈ 90.000 ha	> 10.000 ha

2.3.2 Datos sobre disponibilidad y calidad de agua y suelo

Para realizar una comparación entre las tres minas estudiadas hasta ahora, es necesario datos que permitan cuantificar el daño causado. Un estudio ambiental se centra en la disponibilidad y calidad del agua y del suelo, ya que son los medios de subsistencia de una comunidad. Al presentarse una afección al agua y al suelo, habrá una afección directa en la alimentación, salud y empleo de comunidades aledañas a la actividad minera, incluso la contaminación en el aire es muy importante en cuanto a salud se refiere.

2.3.2.1 Disponibilidad de agua

Tal vez el impacto más significativo de un proyecto minero es el efecto en la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en la zona del proyecto (**ELAW,**



2010). La disponibilidad del agua en las áreas estudiadas tanto en las tres minas como en el área de Quimsacocha se ven comprometidas por los cambios en la precipitación y escorrentía debido a variaciones drásticas en la topografía, por ejemplo, la desaparición de lagos y la vegetación, disminuyendo además la capacidad de retención de agua. La preocupación principal es si tanto el agua superficial como el agua subterránea permanecerán aptas para el consumo humano, y si la calidad del agua superficial en el área del proyecto continuará siendo adecuada para mantener las especies acuáticas nativas y la vida silvestre terrestre (**ELAW, 2010**). Estos valores de calidad del agua son difíciles de demostrar, debido a que en las áreas mineras estudiadas no existe un estudio de referencia, como en la mayoría de los casos en todo el mundo, dificultando así la determinación del verdadero problema de la disponibilidad del agua.

Las precipitaciones altas o bajas dan lugar a cantidades de descarga grandes o pequeñas, sin embargo no se podrían cuantificar si estas variables causarán la mayoría de los problemas. Por un lado, las bajas cantidades de lluvia y descarga significan que los metales pueden acumularse a concentraciones más altas. Aunque también significa que la contaminación no se extenderá tan lejos a lo largo de las corrientes de agua y el área afectada es más limitada. Por otra parte, altas cantidades de lluvia y descarga significan un aumento de problemas como lixiviación, AMD, problemas de almacenamiento, etc. El uso de grandes cantidades de agua en el procesamiento de los minerales, restringe la disponibilidad aguas abajo, provocando escasez y conflictos entre la mina y la población (**Velasquez, 2012**). Los datos de precipitación (media anual en mm) y descarga (m^3/s) registrados en las tres minas son: 350,20 mm y 93,00 m^3/s para Kori Kollo; 900,00 mm para Cerro de Pasco; 729,60 mm y 1,45 m^3/s para Yanacocha (**Placlet, 2013**). Los datos de lluvia y descarga para Kori Kollo fueron tomados de (**Montoya y Mendieta, 2006**). Los datos de descarga son los datos de descarga del río Desaguadero, el principal río que drena el área minera. Para Cerro de Pasco, los datos de lluvia fueron recuperados de SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú). Para el área de Yanacocha se utilizaron los datos pluviométricos de Cajamarca (la precipitación media anual entre 1959 y 1991) obtenida del CPNTC (Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima). Los datos de descarga del Río Porcón tienen un valor promedio anual de 1453 l/s (**Grufides, 2004**).

2.3.2.2 Calidad del agua

La calidad del agua se mide por la cantidad de sustancias tóxicas que presenta, la acidificación y acumulación de sedimentos. Para poder evaluar la calidad del agua de las diferentes minas, se utilizan estándares de calidad sobre las sustancias tóxicas que estas emanan, acidificación y sedimentación, llegando así a una comparación relativa y absoluta de los datos disponibles de estas minas estudiadas.

Para las sustancias tóxicas hay muchas normas que indican valores máximos para diferentes usos. Para el agua potable se escoge utilizar los criterios más estrictos de la Unión Europea (Directiva UE sobre agua potable), los Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (**OMS, 2008**). Para el riego, las normas de calidad de la FAO (1985) y se utilizan para la vida acuática de la EPA los estándares de la



EPA (1994), ya que estos tienen los datos más elaborados. Los estándares para TDS y coliformes fecales se eligen de las mismas fuentes. Para el pH se utilizan los estándares de agua de bebida (**WHO, 2007**). Estos valores de las normas serán comparados con los valores encontrados en cuerpos de agua que se encuentran en las tres minas descritas. Tomamos esas cantidades y las colocamos en una escala de limitación de uso, tendríamos para el agua potable valores sin limitaciones, los de la vida acuática presentan alguna limitación, los de riego con una fuerte limitación de uso y los valores mostrados a continuación en la tabla 4, serían los valores con un uso muy limitado.

Tabla 4: Clasificación para la evaluación de la cantidad de agua basada en metales pesados, coliformes, TDS, y pH (Placlet, 2013).

Valores de alta limitación	
Normas de metales pesados	Plomo $\geq 5.000 \mu\text{g/L}$
	Mercurio $\geq 2,4 \mu\text{g/L}$
	Arsénico $\geq 360 \mu\text{g/L}$
	Cianuro $\geq 50 \mu\text{g/L}$
	Cobre $\geq 200 \mu\text{g/L}$
pH	pH $< 6,5$ y
	pH $\geq 9,5$
TSD	$\geq 1.000 \text{ mg/L}$
Coliformes Fecales	> 2.000

La recopilación de datos se limita, en su mayoría, a algunas campañas de evaluación (básicas) realizadas por ONG locales y/o extranjeras y, en menor medida, por universidades locales. Sólo para la mina Kori Kollo se llevó a cabo un estudio oficial apoyado por el gobierno como parte de la fase de cierre y rehabilitación, debido a las muchas quejas sobre la situación de las diferentes cuencas de este proyecto, sobre todo en la cuenca de Sora Sora donde las aguas de las minas discurren sin ningún tratamiento hacia el río Huanuni, llegando al lago Poopó, contaminando a su paso todo lo que encuentran (**Mollo, 2009**).

En la tabla 5 se muestra los diferentes criterios de las normativas para establecer la calidad del agua en los efluentes de las diferentes minas estudiadas. Para Kori Kollo se obtienen los datos promediados de los pozos de agua potable en los pueblos situados aguas debajo de las operaciones mineras (**P.C.A. Ingenieros consultores S.A., 2011**), para Cerro de Pasco los datos fueron recuperados de los documentos por la ONG local (**Labor, 2009**) y (**Labor, 2008**). Para Yanacocha se utilizan los datos de la cuenca Porcón, el agua de esta cuenca drena hacia la ciudad de Cajamarca (**Atkins et al., 2005**).

Tabla 5: Parámetros de la calidad del agua encontrados en las minas estudiadas.

		Kori Kollo	Cerro de Pasco	Yanacocha
Normas de metales pesados	Plomo [$\mu\text{g/L}$]	< 1	689 ± 1.427	5
	Mercurio [$\mu\text{g/L}$]	$< 0,01$	< 5	0,2
	Arsénico [$\mu\text{g/L}$]	440 ± 151	78 ± 87	5



Cianuro [$\mu\text{g/L}$]	0,53 \pm 0,56	7,5 \pm 3,54	2,5
Cobre [$\mu\text{g/L}$]	3,5 \pm 1,3	648 \pm 1.419	104
pH	7,73 \pm 0,76	9,6 \pm 0,61	7,69 \pm 8,93
TSD [mg/L]	2.303,5	557 \pm 433	202
Coliformes Fecales [mpn/100mL]	/	411 \pm 589	5.000

La tabla 6 muestra la relación con los colores de la tabla 5, clasificando cada parámetro según su limitación de uso:

Tabla 6: Limitación de uso.

	Sin Limitaciones de uso
	Alguna limitación de uso
	Fuerte limitación de uso
	Uso muy limitado

2.3.2.3 Disponibilidad y calidad del suelo

Las zonas intervenidas por proyectos mineros pueden contaminar grandes extensiones de suelos. Los suelos contaminados por derrames de compuestos químicos y residuos en las minas son riesgosos cuando estos materiales son mal utilizados como materiales de relleno, en jardines ornamentales en las instalaciones de la mina o como suplementos de suelos (**MINEO Consortium, 2000**).

Los estudios de disponibilidad y calidad del suelo son escasos, sólo para Kori Kollo se estudió la calidad del suelo, estudiando algunos metales pesados, el pH y la conductividad eléctrica (**Montoya y Mendieta, 2006; P.C.A. ingenieros consultores S.A., 2011**). Los valores se pueden ver en la tabla 7. Se estudiaron dos tipos de áreas, la propia mina cerrada, pero también los alrededores (campo y aldeas). Los datos se comparan con 2 estándares de calidad del suelo, la Norma de Intervención Holandesa y la Norma Agrícola Canadiense. La Norma de Intervención holandesa (**Esdar, 2009**) representa el valor en el cual ya se necesita intervención para restaurar el suelo. Las Normas Agrícolas Canadienses (**CCME, 2007**) representan el valor que no debe ser excedido para los suelos que se utilizan como tierras agrícolas. Para los datos del Cerro de Pasco se obtuvieron de ensayos realizados por parte de (**Centro de Cultura Popular Labor, 2013**).

En la tabla 7 se muestran los datos de las diferentes normas y de dos minerías, comparados con las diferentes normas.

Tabla 7: Calidad de la tierra para las minas de Kori Kollo y Cerro de Pasco.



		Alrededores de Kori Kollo	Sitio de la mina Kori Kollo	Cerro de Pasco	Norma de Intervención Holandesa	Norma Agrícola Canadiense
Calidad del suelo	Plomo [mg/kg]	1,58 ± 1,53	32,2 ± 4,87	597 -6.000	530	70
	Mercurio [mg/kg]	0,011 ± 0,002	/	14 - 213	36	6,6
	Arsénico [mg/kg]	< 0,05	28,8 ± 6,46	92 - 1.480	76	12
	Antimonio [mg/kg]	< 0,05	4,5 ± 2,32	22 - 352	22	20
	Zinc [mg/kg]	2,96 ± 1,80	90,8 ± 12,54	621 - 5.723	720	200
	pH	7,54 ± 0,52	8,48 ± 0,26	3,23 - 4,76	/	6 - 8
	CE [uS/cm]	9.501 ± 5.453	887,2 ± 1.086.55	24,2 - 196.7	/	2.000

Los valores mostrados en la tabla 7 están clasificados por colores, el verde indica muy por debajo de la norma, anaranjado cerca del límite y rojo sobrepasa a la Norma de Intervención Holandesa y la Norma Agrícola Canadiense. Estos últimos son valores críticos presentes en los suelos donde se asientan estas actividades mineras de Kori Kollo y Cerro de Pasco. Sin embargo se puede observar que la calidad del suelo en Cerro de Pasco está más afectado que Kori Kollo, al observar los valores obtenidos en los diferentes ensayos.

2.3.3 Discusión de los datos

2.3.3.1 Disponibilidad y calidad del agua

El área de Kori Kollo, se caracteriza por un promedio bajo de lluvia anual y un alto nivel de descarga del Río Desaguadero. Los principales problemas que presenta consisten en AMD y problemas con la gestión de relaves. La mina consume 8.000 m³/día de agua, es decir en promedio 0,1 m³/s, que es un valor relativamente pequeño en comparación con la descarga promedio del Río Desaguadero de 93 m³/s. Por lo tanto, la disponibilidad de agua en las partes bajas no se ve afectada, sin embargo si el agua residual de la mina no se almacena adecuadamente y no se le da un tratamiento necesario, la contaminación se puede expandir por grandes distancias. La lluvia al ser baja no causará problemas, pero esto es compensado por altas intensidades ocasionales que causan la alta descarga. Esto da lugar a los datos correspondientes de la calidad del agua de esta mina. Los valores de TSD y arsénico son muy altos, superando a los valores máximos permisibles en el caso del arsénico y con valores cercanos a los valores máximos en el caso de TSD (**Mol y Ouboter, 2004**). Estos valores indican una mala gestión ambiental y por ende un mal control de emisiones por parte de la empresa minera.

El Cerro de Pasco dispone solo de datos de lluvia, los cuales se puede observar que son bastante altos y por ende pueden estar vinculados con el problema de AMD, sin embargo este problema está más relacionado con la mala gestión en cuanto a los relaves, los cuales fueron vertidos en un lago cercano, colocando piritas en contacto directo con el agua y el medio natural del lago. Los datos de calidad del agua muestran valores muy altos de cobre, plomo, mercurio y TDS. También el pH está elevado, esto podría ser causado por un manejo inapropiado de los residuos, por



ejemplo el agregado de muchos carbonatos (que están destinados a neutralizar los subproductos ácidos del proceso de minería).

En el caso de Yanacocha se tiene una precipitación media anual alta, sin embargo la descarga es baja apenas de 1,45 m³/s. La mina en sí utiliza una mayor cantidad de agua para los procesos de extracción del material, pudiendo ocasionar una disponibilidad no muy buena de agua para las partes bajas. En cuanto a la calidad del agua sólo se muestran niveles demasiado altos para el cobre, que es un indicador probable de problemas de AMD.

La cantidad y calidad del agua en una zona minera, tiene una gran dependencia de las condiciones climáticas de la zona, de la topografía, orografía y sobre todo de la gestión ambiental que cada empresa minera aplique para evitar daños al medio ambiente.

2.3.3.2 Calidad del suelo

En la mina de Kori Kollo se observó que solo la conductividad eléctrica es elevada en las áreas circundantes, mientras que para el sitio de explotación minera se observan valores altos de arsénico y pH. La elevada conductividad eléctrica probablemente no esté relacionada con la mina, sino más bien con las características intrínsecas del suelo de esta área. Los altos contenidos de arsénico se pueden explicar de la misma manera que para las concentraciones elevadas en agua y en comparación con los valores de las diferentes normas expuestas, son todavía bastante bajos (**Bech et al., 1997; Jasso-Pineda et al., 2007; Razo et al., 2004**). El alto pH es típico del área, ya que muchas cuencas endorreicas están presentes en el sistema interandino, esto podría significar que el pH normal del entorno es realmente causado por la acidificación. Otra explicación puede ser el uso de carbonatos para neutralizar los residuos que aumentan el pH del suelo en el sitio minero.

En el caso de Cerro de Pasco los valores de plomo, mercurio, arsénico, antimonio, zinc y pH, son altos, sobrepasando los valores límites impuestos por las normas mencionadas. Esta grave situación en los suelos de esta mina, se debe a una mala gestión ambiental por parte de las empresas mineras, dando lugar a daños muy graves en el medio ambiente y afectando a las comunidades asentadas cerca de la mina.

2.3.3.3 Impactos sociales y económicos

Los proyectos mineros generan acerca de la calidad y cantidad de agua disponible desencadenando numerosos y a veces violentos conflictos entre mineros y comunidades (**Bebbington y Williams, 2008**).

Las actividades mineras que no son adecuadamente manejadas y controladas resultan en la degradación de suelos, agua y biodiversidad, afectando los recursos forestales y otros necesarios para las actividades productivas locales y para la subsistencia de la población local.

En cuanto a lo social, las comunidades enfrentan problemas con la calidad del agua, registrándose una mayor tasa de enfermedades, y en cuanto al uso del suelo, un problema en la agricultura, generando una falta en el abastecimiento de alimentos,



y si hay este abastecimiento por lo general se encuentran contaminados, registrándose problemas de salud aún más graves.

2.3.4 Conclusión

Las áreas mineras estudiadas presentan problemas similares, como son el problema de AMD que conduce a niveles elevados de metales pesados en las corrientes de agua circundantes y la contaminación de los suelos, alterando sus propiedades químicas y mecánicas. El nivel de contaminación depende principalmente de los siguientes factores: la cantidad de lluvia y descarga, gestión de los relaves, tiempo de operación, cumplimiento de los estándares de concentraciones máximas permisibles para agua, suelo y aire, composición de las rocas y sobre todo el desarrollo de un plan de manejo de desechos enfocados en la sostenibilidad.

Por la falta de datos en las tres minas analizadas, no se pueden realizar conclusiones y comparaciones, sin embargo entre las tres hay una estrecha relación con respecto a los contaminantes presentes en el agua y suelo. Los valores de contaminación de algunas de estas minerías son más elevados que otras, superando también los valores estándar, siendo estos valores más elevados en el sitio de la mina que en las zonas aledañas a la misma, no obstante hay que prestarle igual o mayor atención a estos sectores, que son afectados de igual manera.

Si observamos lo encontrado tanto en la mina de Kori Kollo y la de Cerro de Pasco, en cuanto a la calidad del suelo, vemos que están muy contaminados y requieren de un plan de manejo para su recuperación.

La afección al suelo es una afección directa al almacenamiento de agua en el mismo y si existe almacenamiento, el agua que circula a través de este se contamina de igual manera debido a las propiedades químicas nuevas que el suelo adquiere.

3. Métodos de obtención de flujo base para el área de Quimsacocha

El flujo base se relaciona con la descarga desde el almacenamiento de agua subterránea u otras fuentes (reservas) como glaciares, lagos y humedales (**Smakhtin, 2001**). Este mantiene caudales durante periodos en los cuales no hay presencia de lluvias (precipitación) o escurrimiento directo (**Guzmán, 2015**). Cuando nos referimos al flujo base, implícitamente están procesos hidrológicos sub-superficiales, siendo el conocimiento de estos procesos crucial para la predicción de caudales bajos durante periodos de sequía.

Las cuencas andinas en Ecuador, presentan una heterogeneidad importante en función del rango de elevación, heterogeneidad expresada en una alta variabilidad espacial de la precipitación y la temperatura (**Céleri et al., 2007**). Como consecuencia se presenta diferentes ecosistemas y diferentes patrones de respuesta hidrológica.

Este capítulo expone métodos de estudio para el flujo base de las tres microcuencas: Zhurucay, Calluancay y Quinuahuaycu, útiles para identificar la recarga. La aplicación de diferentes métodos para separar el flujo base permitirá realizar una comparación para evaluar las diferencias y similitudes en las características del flujo



base de las tres microcuencas analizadas y así evaluar el posible impacto a causar la minería en dichas fuentes de agua.

3.1 Datos meteorológicos e hidrológicos de las tres microcuencas.

Para analizar la hidrología de las tres microcuencas, se necesitan datos de precipitación, evapotranspiración y caudales. Los datos de precipitación y descarga son obtenidos a través de la Universidad de Cuenca, Programa para el Manejo de Agua y del Suelo (PROMAS). En este estudio se obtiene una serie completa de datos desde julio de 2011 hasta noviembre de 2012. La lluvia se midió con pluviómetros con un sistema de cuchara basculante de resolución de 0,2 mm. Los caudales se miden a través del registro del nivel de agua de Schlumberger Divers en los vertederos en V situados en la desembocadura de las microcuencas como se observa en el gráfico 5.

El cálculo de la evapotranspiración se realiza a través de la ecuación de Penman - Monteith, en la cual se requieren datos climáticos, obtenidos para el periodo de julio de 2011 a noviembre de 2012. Estos datos implican la temperatura máxima y mínima, temperatura rocío, humedad relativa máxima y mínima, velocidad del viento, lluvia y radiación solar. Para delinear las cuencas y definir las áreas atribuidas a los ríos, se necesitan datos cartográficos, proporcionados también por la Universidad de Cuenca.

Los gráficos 2 y 3 del Capítulo 1, muestran el Régimen Anual de Temperatura y el Régimen Anual de Precipitación del área de Quimsacocha, respectivamente, usando los datos empleados en el estudio del flujo base. En la tabla 8 se muestran los datos hidrológicos analizados de precipitación y esorrentía específica superficial para cada microcuenca.

Tabla 8: Datos hidrológicos de toda la serie de datos de cada microcuenca.

<i>Microcuenca</i>	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Caudal Específico (mm)</i>
Calluancay	1512,00	857,65
Zhurucay	1650,00	681,20
Quinuahuaycu	1888,00	1071,32

3.1.1 Calidad de la serie cronológica.

Para la obtención de resultados confiables y reales, es necesario la comprobación de la fiabilidad de los datos de origen. Se analizó los datos climáticos, eliminando datos atípicos y rellenando con valores medios mensuales. Los datos de precipitación y caudales, se examinó la calidad de los datos a través de un análisis por separado de cada microcuenca, de las series temporales por parcelas en caja y la distribución de frecuencias.

La evapotranspiración de referencia, calculada usando la ecuación de Penman – Monteith, se utilizó la estación Quimsacocha 1, a una altura de 3.762 m.s.n.m., con



serie de datos desde el 6 de julio de 2011 hasta el 27 de noviembre de 2012. Tiene un valor promedio de 1,727 mm/d.

Para el cálculo de la evapotranspiración real, se utiliza la ecuación 1 mostrada a continuación:

$$ET = ET0 * K_v * K_s \quad (1)$$

Dónde $ET0$ es la evapotranspiración de referencia en mm, K_v el coeficiente del tipo de vegetación y K_s es el coeficiente de estrés hídrico.

Los valores a usar del coeficiente de cultivo se toma según la tabla 1, en la cual se elabora una nueva tabla (tabla 9) que establece que las tres microcuencas poseen un tipo de vegetación específica para cada una. Se establece un K_s igual a uno, ya que se considera que en la zona de estudio no se produce un agotamiento de humedad y que no se encuentra agua fácilmente aprovechable, es decir que en la zona de estudio no se produce un estrés hídrico.

Tabla 9: Tipo de vegetación predominante en cada microcuenca.

Microcuenca	Tipo de Vegetación	
Calluancay	Pajonal	Chaparro
Zhurucay	Pajonal	-
Quinuahuaycu	Pajonal	Chaparro

Al observar la tabla 1 del capítulo primero, observamos que cada microcuenca posee un tipo de vegetación dominante, en el caso de Calluancay y Quinuahuaycu posee chaparros con un porcentaje alrededor del 29% y 32% respectivamente y la microcuenca de Zhurucay pajonales con un 71%.

En la tabla 10 se presentan los coeficientes de cultivo utilizados que son obtenidos por otros autores.

Tabla 10: Coeficientes de cultivo para Calluancay y Quinuahuaycu de chaparros y para Zhurucay de pajonal, encontrados en otras literaturas.

Microcuenca	Coeficiente de Cultivo (BISms)	Coeficiente de Cultivo (Barrera y Torres, 2010)	Coeficiente de Cultivo (Buytaert W. et al., 2005)
Calluancay	0,55	0,686	0,42
Zhurucay	0,95	-	-
Quinuahuaycu	0,55	0,498	0,58

Los valores de coeficiente de cultivo optados para el cálculo de la evapotranspiración real son tomados de **(BISms)**, para Calluancay un $K_v = 0,55$ (Chaparros), para Zhurucay un $K_v = 0,95$ (Pajonal) y para Quinuahuaycu un $K_v = 0,55$ (Pajonal).

Una vez obtenidos los valores de evapotranspiración real, se realiza una comparación entre las tres microcuencas, obteniendo el gráfico 10:

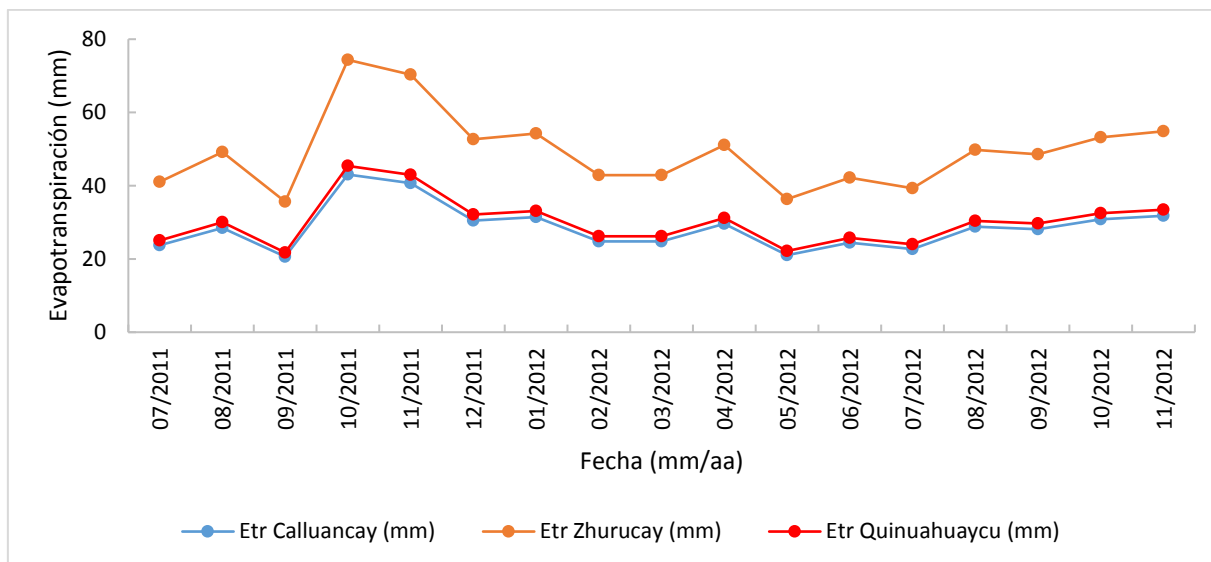


Gráfico 10: Evapotranspiración real mensual de las microcuencas estudiadas.

3.2 Evaluación del flujo base

En cuanto a la medición del flujo base, no hay una forma o manera directa de medirlo continuamente (**Furey y Gupta, 2001**). Sin embargo, solamente durante períodos secos largos, se puede llegar a observar el flujo base en fuentes superficiales, para otros períodos, se requiere el uso de métodos de separación de flujo base.

El objetivo principal de este trabajo, se enfoca en investigar si el flujo base muestra un comportamiento distinto en las tres microcuencas estudiadas de Calluancay, Zhurucay y Quinuahuaycu, identificando la recarga y el posible grado de afección en cada una de ellas. Se estima y compara el flujo base entre ellas a través de tres métodos que son: filtros digitales, regresión no lineal y filtros físicos, como se describirá a continuación cada uno de ellos.

3.2.1 Filtros Digitales

El uso de filtros digitales es una alternativa muy empleada para series de datos temporales largas, lo cuales indican que la fuerza de estos filtros es la reproducibilidad, mientras que no tienen ninguna base física (**Arnold y Allen, 1999**). Estos filtros digitales son más objetivos que el enfoque gráfico y, a menudo más fáciles y rápidos de implementar (**Furey y Gupta, 2001**). Los resultados obtenidos de usar los filtros digitales, son realistas debido a que el flujo base es restringido de tal manera que no excede el valor del caudal específico, ni se convierte en negativo (**Guzmán, 2015**).

El filtro de BFLOW (**Lyne y Hollick, 1979**) y el filtro de Eckhardt se basan en la idea de que las ondas de alta frecuencia pueden estar asociadas con la escorrentía directa y las ondas de baja frecuencia pueden asociarse con el flujo base (**Eckhardt,**

2005). BFI_{max} restringe el flujo base máximo, lo que significa que BFI alcanza BFI_{max} cuando las ondas tienen una frecuencia predominantemente baja. Si BFI_{max} aumenta, más ondas de alta frecuencia se incluyen desde el hidrograma de caudales, y por lo tanto BFI se hace menor que BFI_{max} (Guzmán et al., 2015). El componente de alta frecuencia puede representar sólo una parte de la escorrentía superficial en lugar de la escorrentía superficial total, de modo que la interpretación física del flujo base como componente de baja frecuencia y la escorrentía directa como componente de alta frecuencia puede ser incorrecta (Spongberg, 2000).

Los filtros digitales de Lyne y Hollick o BFLOW y Eckhardt están integrados en la herramienta de Análisis de Hidrografía GIS (WHAT) (Lim et al., 2005).

El BFLOW se define como:

$$qd_t = \alpha \cdot qd_{t-1} + \frac{1 + \alpha}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (2)$$

Dónde, qd_t es la escorrentía directa filtrada en el tiempo t (m^3/s); qd_{t-1} es la escorrentía directa filtrada en el tiempo $t - 1$ (m^3/s); α es el parámetro de filtro; Q_t es el caudal total en el tiempo t (m^3/s) y Q_{t-1} es el caudal total en el tiempo $t - 1$ (m^3/s).

El filtro Eckhardt está definido por:

$$qb_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha + qb_{t-1} + (1 - \alpha) BFI_{max} Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (3)$$

Dónde, b_t y b_{t-1} es el flujo base (m^3/s) en el tiempo t y $t - 1$, respectivamente. BFI_{max} se considera como el valor máximo del índice de flujo base, es decir la relación a largo plazo del flujo base y el caudal total. Con el fin de minimizar la influencia de una elección subjetiva de BFI_{max} , se han sugerido valores para este, considerando diferentes condiciones hidrogeológicas (Eckhardt, 2005). Los valores de BFI_{max} varían desde 0,25, sobre 0,50 hasta 0,80 para corrientes perennes con acuíferos de roca dura, corrientes intermitentes con acuíferos porosos y corrientes perennes con acuífero poroso, respectivamente, con el fin de deducir si la respuesta del flujo base de las microcuencas corresponde a uno de los tipos de acuíferos descritos.

3.2.2 Regresión no lineal

Al ser el flujo base un componente continuo en un hidrograma, es necesario identificar los puntos inicial y final para la separación del mismo (Chow et al., 1988). Chapman (1999), quien comparó varios métodos para separar el flujo base de los hidrogramas, definió el punto inicial y final identificando el momento en que comienza y termina la escorrentía directa, respectivamente.

La tasa de recesión del flujo base se estudia durante períodos con poca o ninguna precipitación (Tallaksen, 1995). En nuestro trabajo se consideró como periodo de agotamiento a diez días con una precipitación media diaria de menos de 0,5 mm/d, que es notablemente menor que la evapotranspiración, incluso a mayores altitudes.

Aunque las características de descarga de recesión son por naturaleza no lineales, **Wittenberg (1999)** señaló que debido a la formulación matemática más fácil, los modelos conceptuales para los procesos de escorrentía han sido predominantemente lineales. Por lo tanto, las curvas de recesión son a menudo sección por sección aproximadas por depósitos lineales con diferentes constantes de recesión (k). Si el conjunto resultante de k - valores es diferente, hay una fuerte indicación para el carácter no lineal de la recesión. Esto es especialmente cierto cuando varían de forma sistemática según el nivel de la etapa (**Prasad, 1967; Wittenberg, 1994**). La ecuación de almacenamiento no lineal se expresa como (**Wittenberg, 1999**):

$$S = aQb^b \quad (4)$$

Dónde: S es el almacenamiento del acuífero en m^3 , Qb es la tasa de descarga en m^3s^{-1} , a es el factor de dimensión $m^{3-3b}s^b$ y b es adimensional, cuando $b = 1$, corresponde a un reservorio lineal.

Para este estudio, el gasto fue expresado en volumen por unidad de área por cada día (d), entonces S es en mm, Q en $mm\ d^{-1}$ y a en $mm^{1-b}d^b$.

La salida del acuífero puede ser derivada de la ecuación 4, dando origen a la ecuación 5:

$$Qb = \left[\frac{S}{a} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (5)$$

Al combinar la Ecuación 4 con la ecuación de continuidad $\frac{\delta S}{\delta t} = -Q$, se obtiene la Ecuación 6:

$$Qt = Qo \left[1 + \frac{(1-b) Qo^{1-b}}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (6)$$

Dónde, Qt es la curva de recesión de un reservorio no lineal y Qo es la descarga inicial.

El valor del coeficiente a puede obtenerse a través de:

$$a = \frac{\sum(Q_{i-1} + Q_i)\Delta t}{2 \sum(Q_{i-1}^b + Q_i^b)} \quad (7)$$

Este parámetro de almacenamiento a puede determinarse mediante una calibración iterativa por mínimos cuadrados de una serie temporal de recesión. El valor de b recomendado por **Wittenberg y Sivapalan (1999)**, **Wittenberg (1999)** y **Chapman (1999)** es igual a 0,5.

3.2.3 Filtros físicos

Los enfoques gráficos y de filtro carecen de una base física (**Furey y Gupta, 2001**). Al comparar con este método las tres microcuencas, se espera que las diferentes características físicas de cada una de lugar a diferentes patrones de flujo

base. Por lo tanto, es deseable una base conceptual física para el método de separación de flujo base (**Guzmán, 2015**).

El filtro físico desarrollado por **Furey y Gupta (2001)** se deriva de la ecuación de balance de masa para el flujo base desde una ladera. Los principales supuestos del filtro son que la cuenca está compuesta por n colinas y que el agua canalizada puede ser encaminada instantáneamente dentro del paso de tiempo del modelo de cada colina a la salida. Bajo estas condiciones, el flujo base y flujo de escorrentía se definen como:

$$\overline{qb}_{B,j} \equiv \sum_{i=1}^n \overline{qb}_{i,j} \quad (8a)$$

$$\overline{Q}_{B,j} \equiv \sum_{i=1}^n \overline{Q}_{i,j} \quad (8b)$$

Dónde el subíndice B indica la cuenca, i la colina, j el tiempo, \overline{qb} el flujo base y \overline{Q} el valor total de descarga. Para la conservación de la masa se tiene:

$$c_1 + c_2 + c_3 = 1 \quad (9)$$

Dónde, c_1 , c_2 , c_3 , son fracciones de precipitación transformadas en flujo terrestre, evapotranspiración y recarga respectivamente. Los valores de c_1 , c_2 , c_3 , para una ladera son similares que para una cuenca. Durante un largo periodo, el cambio neto en el almacenamiento de agua en una cuenca es próximo a cero, por lo tanto el valor de c_2 se puede calcular a través de:

$$c_2 = 1 - c_1 = 1 - \frac{\sum_{j=jo}^{jo+T} \overline{Q}_{B,j}}{\sum_{j=jo}^{jo+T} \overline{P}_{B,j}} \quad (10)$$

Dónde, \overline{P} es la precipitación. Por lo tanto, las ecuaciones del filtro físico son (**Furey y Gupta, 2001**):

$$\overline{qb}_{B,j} = (1 - \gamma) \overline{qb}_{B,j-1} + \gamma \left(\frac{c_3}{c_1} \right) (\overline{Q}_{B,j-d-1} - \overline{qb}_{B,j-d-1}) \quad (11)$$

$$\overline{Q}_{B,j} = (1 - \gamma) \overline{Q}_{B,j-1} + \sum_{i=1}^n [c_1 \overline{P}_{i,j} - (1 - \gamma) c_1 \overline{P}_{i,j-1} + \gamma c_3 \overline{P}_{i,j-d-1}] \quad (12)$$

Donde el subíndice d es un tiempo de retraso para la recarga, considerando la recarga como una respuesta retardada a la precipitación. $1 - \gamma$ es la constante de recesión de la cuenca definida como un parámetro no dimensional que describe la velocidad a la que disminuye el caudal mientras se recarga por el agua subterránea (**Vogel and Kroll, 1996**).

Para estimar los valores de γ , c_1 y c_3 , **Furey y Gupta (2001)** utilizan la ecuación 12 bajo condiciones de precipitación ($\overline{P}_{B,j}$; $\overline{P}_{B,j-1}$; $\overline{P}_{B,j-d-1}$), resultando en:

$$(1 - \gamma) = \frac{\overline{Q}_{B,j}}{\overline{Q}_{B,j-1}} \quad \text{si} \quad \overline{P}_{B,j} = \overline{P}_{B,j-1} = \overline{P}_{B,j-d-1} = 0 \quad (13)$$



$$c_1 = \frac{\bar{Q}_{B,j} - (1-\gamma)\bar{Q}_{B,j-1}}{\bar{P}_{B,j}} \quad \text{si} \quad \bar{P}_{B,j} > 0, \bar{P}_{B,j-1} = \bar{P}_{B,j-d-1} = 0 \quad (14)$$

Dónde, c_2 se calcula usando la ecuación 10, y c_3 mediante la ecuación 9. Las condiciones específicas de precipitación en la ecuación 13 y 14, son muy difíciles de encontrar en los registros de precipitación de las microcuencas estudiadas. Por lo tanto aplicamos la ecuación 13 para:

$$\bar{P}_{B,j} = \bar{P}_{B,j-1} = \bar{P}_{B,j-d-1} \leq 0,5 \quad (15)$$

Suponemos que durante estos eventos específicos, la influencia de la precipitación en la descarga es insignificante (ecuación 11).

En el siguiente capítulo se obtendrán los resultados obtenidos a partir de la serie de datos de cada microcuenca, con la utilización de los diferentes métodos explicados en el presente capítulo.

4. Resultados y discusión

El capítulo anterior, describe los métodos para la obtención del flujo base de las tres microcuencas estudiadas, este capítulo muestra los resultados obtenidos de cada método.

4.1 Resultados obtenidos por método de aplicación

4.1.1 Filtros Digitales

En este método se empleó WHAT para la separación de flujo base de cada serie de datos de descarga de las microcuencas estudiadas. Para el filtro BFLOW se empleó un parámetro de filtro (α) de 0,925 y para el filtro de Eckhardt hemos ido cambiando gradualmente el valor de BFI_{max} de 0,25 a 0,80.

(Nathan y McMahon, 1990) encontraron que el parámetro de filtro de 0,925 dio resultados realistas en comparación con los resultados de separación manual.

Los datos de flujo base obtenidos muestran una pequeña variación entre los valores de la microcuenca de Quinuahuaycu y Calluancay, y una variación muy apreciable entre estas microcuencas y la de Zhurucay, considerando el mismo periodo de tiempo de las series y el mismo tipo de filtro, obteniéndose los valores más altos de flujo base en la microcuenca de Quinuahuaycu y los más bajos en la microcuenca de Zhurucay.

Tabla 11: Valores de BFI para las microcuencas de Calluancay, Zhurucay y Quinuahuaycu.

	<i>Calluancay</i>	<i>Zhurucay</i>	<i>Quinuahuaycu</i>
Eckhardt filter, $BFI_{max}= 0,25$	0,30	0,28	0,28
Eckhardt filter, $BFI_{max}= 0,50$	0,48	0,44	0,45
Eckhardt filter, $BFI_{max}= 0,80$	0,67	0,63	0,65
BFLOW filter	0,69	0,66	0,67

La tabla 11 muestra que los valores de BFI_{max} de 0,25 o 0,50 tienden a ser cercanos a BFI_{max} , sin embargo cuando se utiliza el valor de 0,80, BFI es un 19% más bajo que BFI_{max} .

Los verdaderos valores de BFI son desconocidos (Eckhardt, 2008). Sin embargo, los valores obtenidos al usar un BFI_{max} de 0,80 nos da una buena aproximación para las microcuencas estudiadas como sus características geomorfológicas físicas. Esto se puede afirmar por el hecho de que la microcuenca de Calluancay es la de mayor recarga y la de Zhurucay la de menor.

Las tres microcuencas pertenecen a la Subcuenca de Tarqui, por lo que se realiza una comparación del valor de BFI obtenido con BFI_{max} de 0,80 con el estudio realizado por Guzmán et al (2015), donde se observa en la tabla VII de dicho estudio un valor de BFI para Tarqui río abajo de 0,65, que es muy próximo a los valores obtenidos en las tres microcuencas (tabla 11).



En el Anexo 1 se observarán los gráficos obtenidos de flujo base en cada microcuenca, mediante el método de filtros digitales.

4.1.2 Regresión no lineal

Wittenberg (1999) nos muestra que el análisis de las curvas de recesión de flujo permite la determinación de las características del reservorio de agua subterránea. Se pretende caracterizar el almacenamiento de las tres microcuencas estudiadas, comparando los valores de a para cada una.

$$a(m^{3-3b}s^b) \quad (16)$$

La comparación del valor de a , se obtiene en función del valor de $b = 0,5$ como muestra la ecuación 16. Los valores obtenidos de a para Calluancay es de 31, Zhurucay 86 y Quinuahuaycu 14.

El valor más alto de a , es el valor de la microcuenca de Zhurucay, en comparación con las otras dos microcuencas. A pesar de mostrar un alto valor de a , es decir un alto almacenamiento, los valores de caudales base obtenidos son los menores en comparación con los de las otras dos microcuencas. Siendo la capacidad de almacenamiento de Zhurucay mayor en un 64% y un 84% con respecto a la microcuenca de Calluancay y Quinuahuaycu respectivamente. En cuanto a los valores de $a/\text{Área} (m^{3-3b}s^bm^{-2})$ de cada microcuenca se tiene: Calluancay – 7,14E-06, Zhurucay – 3,05E-05 y Quinuahuaycu – 2,64E-06.

Las subcuencas más grandes generalmente muestran un mayor almacenamiento, y esto se observa al momento de obtener los caudales base a partir de este análisis, donde se obtienen caudales base mayores en la microcuenca de Quinuahuaycu con un área de 5,31 km², seguido de la microcuenca de Calluancay de 4,34 km² y con caudales más bajos en la microcuenca de Zhurucay con el área más pequeña de 2,46 km². Por esta razón para comparar coeficientes de almacenamiento a de las tres microcuencas, es necesario usar caudales o escorrentías específicas.

Además del área que abarca cada microcuenca, se debe considerar el tipo de ecosistema presente en cada una de ellas, su composición y proporción que influyen en el almacenamiento.

En el Anexo 1 se muestra los valores obtenidos de a y los gráficos de los caudales base de cada microcuenca a través de este análisis en el programa de Matlab.

4.1.3 Filtros Físicos

En la ecuación 11 del capítulo anterior, se emplea un tiempo de retraso para la recarga (d) de cero días. Se considera adecuado el uso de $d = 0$, debido a que esto indica que la respuesta de las microcuencas se produce dentro del mismo día de precipitación.

Las constantes de recesión estimadas $(1 - \gamma)$ son cercanas con el valor obtenido por **(Guzmán, 2015)** en la Subcuenca de Tarqui, que es de 0,94. Se encontraron valores ligeramente superiores de $(1 - \gamma)$ para la microcuenca de

Calluancay, seguido de la microcuenca de Zhurucay y finalmente la microcuenca de Quinuahuaycu. En la tabla 12 se muestra los valores encontrados de cada parámetro para cada microcuenca.

Tabla 12: Valores de parámetros del análisis por filtros físicos para cada microcuenca.

	Calluancay	Zhurucay	Quinuahuaycu
$(1 - \gamma)$	0,97	0,96	0,93
C3/C1	19,39	1,07	7,35
C1	0,57	0,41	0,57
C2	0,34	0,54	0,39
C3	0,09	0,05	0,04

El flujo terrestre (c_1), en las microcuencas de Calluancay y Quinuahuaycu tienen el mismo valor, mientras que la microcuenca de Zhurucay varía con respecto a las otras en un 28% menos. Y la recarga (c_3), presenta su mayor valor en la microcuenca de Calluancay, seguido por la microcuenca de Zhurucay con una variación de 44% menos con respecto a la de Calluancay. La microcuenca de Quinuahuaycu varía con un porcentaje de 56% menos con respecto a la de Calluancay. Como consecuencia los valores de c_3/c_1 , es mayor en la microcuenca de Calluancay, y menor en la microcuenca de Zhurucay. La recarga media (c_3), se calcula en base a los valores de c_1 y c_2 , donde c_1 se calcula a partir de la Ecuación 14 y c_2 se calcula utilizando los datos de precipitación y descarga de las series de datos. El valor de c_2 en la microcuenca de Zhurucay significa una mayor evapotranspiración y menos agua disponible para la recarga, lo que también es consistente con los valores estimados en el gráfico 10.

Los valores de caudal base obtenidos para las microcuencas de Calluancay y Quinuahuaycu son altos en comparación con los valores de la microcuenca de Zhurucay.

Furey y Gupta (2001) también observaron la necesidad de considerar a c_3/c_1 como una variable dependiente del tiempo debido a cambios en la evapotranspiración (c_2), la humedad del suelo y la precipitación. c_2 (mm) estimado para los meses húmedos y secos varía de 0,25 a 0,93 en la microcuenca de Calluancay, de 0,33 a 0,81 en la microcuenca de Zhurucay y de 0,27 a 0,84 en la microcuenca de Quinuahuaycu con valores más bajos durante el mes de febrero y más alto durante el mes de Septiembre.

La relación c_3/c_1 se puede estimar mediante un procedimiento iterativo en el que el flujo base se adapta al flujo total durante los periodos secos. En Calluancay, Zhurucay y Quinuahuaycu hemos estimado esta relación y encontramos valores de 19,39; 1,07 y 7,35 respectivamente. Un problema importante consiste en evaluar c_3/c_1 durante periodos húmedos. La inclusión de mediciones de la humedad del suelo podría ayudar a estimar c_3/c_1 en periodos húmedos, pero es especialmente difícil a nivel de microcuenca debido a su variación espacial y temporal (**Guzmán, 2015**).



La comparación que se puede hacer con este método, es que la recarga es mayor en la microcuenca de Calluancay, seguida de la microcuenca de Quinuahuaycu, teniendo los valores de recarga más bajos en la microcuenca de Zhurucay. Una de las explicaciones a este hecho es por la menor evapotranspiración potencial a mayor altitud, y el tipo de vegetación presente en cada una de las microcuencas.

Los gráficos de caudal base de cada microcuenca encontrados con este método se muestran en el Anexo 1.

4.2 Resultados Generales

Tener una medida ya sea aproximada o real del flujo base en el campo es muy difícil. Por ende se podría evaluar y comparar el flujo base en las tres microcuencas, suponiendo que el caudal total es igual al flujo base durante los periodos de descarga más bajos, que coinciden con los periodos de alta evapotranspiración y baja precipitación, siendo estos valores más frecuentes desde agosto hasta noviembre de 2011 y desde agosto hasta octubre de 2012.

Al observar los periodos secos de las tres microcuencas, se observa que en la microcuenca de Quinuahuaycu hay una mayor escorrentía específica en comparación con las otras dos microcuencas, siendo en promedio un 30% mayor que la microcuenca de Calluancay y un 44% mayor que la de Zhurucay.

Haciendo una comparación de los caudales base obtenidos por los métodos mencionados, las gráficas de cada microcuenca (Anexo 1), muestran que con el método de filtros físicos se obtiene un caudal base bajo en comparación con los valores obtenidos por los otros dos métodos, esta variación se debe a que no se tiene con certeza un coeficiente de cultivo específico, dando lugar a la variación en los resultados. A pesar de estos resultados, se mantiene la microcuenca de Zhurucay con el caudal base más bajo por los tres métodos, como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13: *Microcuencas con caudales base mayores y menores con sus respectivos caudales específicos.*

Método	Caudal Base mayor	Caudal Específico (mm)	Caudal Base menor	Caudal Específico (mm)
Filtros Digitales	Quinuahuaycu	1.071,32	Zhurucay	681,20
Regresión no lineal	Quinuahuaycu	1.071,32	Zhurucay	681,20
Filtros Físicos	Calluancay	857,65	Zhurucay	681,20

En la tabla 13, el método de filtros físicos muestra con mayor caudal base a la microcuenca de Calluancay, a pesar de que su caudal específico es menor que la de Quinuahuaycu. Esto se debe a que en este método se emplea los valores de coeficiente de cultivo de la tabla 10, dando lugar a establecer con mayores caudales a la microcuenca de Calluancay y menores a la de Quinuahuaycu. En cambio en los métodos de filtros digitales y regresión no lineal, se observa que los mayores caudales base pertenecen a la microcuenca de Quinuahuaycu, que en sí posee el caudal específico más alto, en estos métodos no se utiliza el coeficiente de cultivo, por lo que



sus valores son más aproximados que por el otro método. También se puede observar que en todos los métodos empleados se obtiene a la microcuenca de Zhurucay como la que menor caudales bajos presenta, es decir la menor recarga, a pesar de que en uno de los métodos se emplea un coeficiente de cultivo aproximado.

Los filtros digitales y la regresión no lineal, no son capaces de simular picos bajos. En el caso de los filtros digitales, es provocado por las condiciones impuestas por BFI_{max} y por el filtro de frecuencias bajas como flujo base. En cambio, los filtros de regresión no lineal no capturan picos porque su proceso de filtrado no permite alcanzar un valor máximo en un pico, sino que se limita a un patrón de curva de recesión (**Guzmán, 2015**). Los filtros físicos son los que mejor simulan los picos bajos. Estos picos descritos se pueden observar claramente en las gráficas del Anexo 1.

En la comparación entre Calluancay, Zhurucay y Quinuahuaycu para los períodos de bajo intercambio, la proporción evaluada c_3/c_1 para Calluancay es alrededor del 94% mayor a Zhurucay y 62% mayor a Quinuahuaycu. Esta sobre estimación mostrada en este método, se ve reflejada sobre todo en la microcuenca de Zhurucay, dónde encontramos los valores de flujo base más bajos de las tres microcuencas, y en sí en este método se encuentran también los valores más bajos de caudales base en las tres microcuencas en comparación con los otros métodos.

El páramo es capaz de mantener flujos base incluso en épocas de déficit de precipitaciones, por lo cual se convierte en un ecosistema muy sensible a los diferentes cambios climáticos, cambios en los usos del suelo y sobre todo cuando la vegetación es alterada, y esto se ve reflejado en los valores de caudal base obtenidos por los tres métodos.



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La recarga de agua en el suelo, se divide en almacenamiento y descarga subterránea (flujo base). Sin embargo la variación neta del almacenamiento en un periodo de tiempo prolongado puede ser considerada despreciable, por lo que se establece un almacenamiento imperceptible y el valor de la recarga se asemeja al del flujo base.

En la tabla 8 se puede observar que la microcuenca de Quinuahuaycu es la microcuenca con mayor precipitación y mayor escorrentía específica. La microcuenca de Zhurucay es la segunda más alta en precipitación, sin embargo en cuanto al caudal específico la menor. La microcuenca de Calluancay muestra la precipitación más baja y una escorrentía específica alta en comparación con Zhurucay. La precipitación de Quinuahuaycu es 12,60% mayor a la de Zhurucay y 19,90% mayor a la de Calluancay. La escorrentía específica de Quinuahuaycu es 36,40% mayor a la de Zhurucay y 19,90% mayor a la de Calluancay.

Con los datos hidrológicos se realizó el cálculo de la evapotranspiración real, mostrando mayor evapotranspiración la microcuenca de Zhurucay, seguida de Calluancay y Quinuahuaycu, cuyos valores se encuentran muy aproximados entre sí como se muestra en el gráfico 10. El porcentaje de variación entre Zhurucay y Calluancay es del 57,89% y de Zhurucay con Quinuahuaycu es del 61,05%, es decir posee mayor variación con Quinuahuaycu.

La microcuenca de Zhurucay muestra una precipitación alta y una escorrentía específica baja, sin embargo no se podría decir que hay una mayor recarga debido a que la evapotranspiración es alta. En el caso de las microcuencas de Quinuahuaycu y Calluancay a pesar de tener valores altos de precipitación también poseen valores altos de escorrentía específica sobre todo la microcuenca de Quinuahuaycu, pudiendo ser la recarga mayor por el hecho de que no poseen una evapotranspiración alta en comparación con Zhurucay.

El principal factor que influye en la variación espacial de la evapotranspiración, es la altitud. Por lo que a igual altitud en las tres microcuencas de Calluancay, Zhurucay y Quinuahuaycu se espera que en promedio la evapotranspiración presente un comportamiento temporal parecido. También al analizar los resultados de evapotranspiración, podemos observar que al ser mayor la evapotranspiración, hay una menor cobertura vegetal, pudiendo decir que la microcuenca de Zhurucay, es una zona alterada y erosionada, por lo que presenta estas características.

Las condiciones físicas particulares de cada microcuenca estudiada conducen a diferencias en el comportamiento hidrológico en cada una de ellas, dando lugar así a un análisis comparativo de las tres microcuencas que puede explicar las diferencias en las características del flujo base entre ellas.

Los métodos usados para el cálculo de flujo base para las tres microcuencas destacan a la que posee los valores más bajos a la microcuenca de Zhurucay, sin embargo hay una variación en cuanto a los valores más altos como se muestra en la tabla 13 del capítulo cuarto.

En el método de regresión no lineal, el valor de α (alto almacenamiento) obtenido para las tres microcuencas, arroja un valor alto para la microcuenca de Zhurucay que es la más pequeña y presenta la menor recarga. Seguido de la microcuenca de Calluancay y Quinuahuaycu, siendo esta última la de mayor recarga. Por otra parte al momento de obtener el caudal específico partiendo de los valores obtenidos de flujo base mediante este método para las tres microcuencas, los valores más altos lo obtiene la microcuenca de Quinuahuaycu, que posee la de mayor área de las tres (5,31 km²) con un valor de caudal específico de 764,15 mm, seguido de Calluancay (4,342 km²) con 632,16 mm y Zhurucay (2,46 km²) con 290,49 mm.

De todos los métodos empleados el mayor valor de caudal base nos da el método de regresión no lineal de toda la serie de datos empleada, mostrando a Quinuahuaycu con un valor de recarga de aproximadamente el 17% mayor a la de Calluancay y un 62% mayor a la de Zhurucay.

El método de filtros físicos, fue útil en la identificación del flujo base durante períodos secos, presentando una sobreestimación durante periodos húmedos, debido a que al considerar el almacenamiento imperceptible como se explicó al inicio de este capítulo, establece que toda la recarga es igual al flujo base, cuyo valor aumenta en épocas de lluvia. El análisis del valor de BFI que es igual al caudal base dividido para el caudal total nos presenta valores de 0,14; 0,11 y 0,07 para Calluancay, Zhurucay y Quinuahuaycu respectivamente. Esto indica que Quinuahuaycu posee mayor caudal que Calluancay y Zhurucay como se muestra en la tabla 8, y que Zhurucay posee menor caudal base que las otras dos microcuencas a pesar de tener un caudal total alto.

Al igual que el estudio realizado por **Guzmán (2015)**, el análisis de regresión no lineal explica bien las diferencias en las condiciones de almacenamiento de distintos ecosistemas.

Los datos finales obtenidos de cada microcuenca con los tres métodos dados se obtienen los valores mostrados en la tabla 14:

Tabla 14: Datos de flujo base acumulados de toda la serie obtenidos con los tres métodos empleados.

<i>Microcuenca</i>	<i>Filtros digitales (mm)</i>	<i>Regresión no lineal (mm)</i>	<i>Filtros físicos (mm)</i>
Calluancay	571,61	632,16	121,14
Zhurucay	431,21	290,49	74,86
Quinuahuaycu	695,64	764,15	71,06

En las microcuencas de Calluancay y Quinuahuaycu, los valores obtenidos por el método de filtros digitales y regresión no lineal son muy próximos con una variación de 9,60% en Calluancay y 9,00% en Quinuahuaycu. Sin embargo entre estos dos métodos en Zhurucay existe una variación del 32,60% que es aproximadamente tres veces mayor en comparación con las otras dos microcuencas. La variación de los filtros físicos con los otros dos métodos es grande siendo 80,80% mayor la regresión no lineal en Calluancay, 74,20% en Zhurucay y 90,70% en Quinuahuaycu. Este método muestra a Calluancay como la microcuenca de mayor recarga es decir mayor



caudal base, y varía con los resultados obtenidos con los otros dos métodos. Una de las causas para esta variación es el hecho de que para su cálculo se utilizó los valores de evapotranspiración obtenidos a partir del coeficiente de cultivo mostrado en la tabla 10, siendo estos datos calculados por otros autores, sin un estudio a profundidad de los mismos. El valor de BFI obtenido con los filtros digitales es de 0,67 para Calluancay, 0,63 para Zhurucay y 0,65 para Quinuahuaycu. Los valores de BFI obtenidos mediante filtros físicos nos muestran valores bajos en comparación con los valores obtenidos con el método de filtros digitales, siendo una de las razones que los valores de flujo base con filtros digitales son más altos.

El método de filtros digitales presenta los valores altos de flujo base en las tres microcuencas, sin embargo el método de filtros físicos presentan valores muy bajos de flujo base en ellas. El método de regresión no lineal presenta una variación en Zhurucay, con un valor bajo en comparación con los valores de las otras dos microcuencas.

Analizando la precipitación y el flujo base calculado a partir del método de regresión no lineal de cada microcuenca observamos que en Quinuahuaycu el flujo base es el 40,50% de la precipitación, en Calluancay el 41,80% y en Zhurucay el 17,60%. Siendo el porcentaje mayor en Calluancay.

En Quinuahuaycu el flujo base es el 71,30% de la escorrentía específica, en Calluancay el 73,70% y en Zhurucay el 42,60%. Siendo mayor el porcentaje de Calluancay.

Los porcentajes más bajos obtenidos son de la microcuenca de Zhurucay. Si Zhurucay hubiera presentado una precipitación baja, y a esto sumado una escorrentía específica alta, se podría llegar a establecer que no existe mayor recarga porque la mayoría escurre de manera superficial, sin embargo este no es el caso de esta microcuenca, lo que ratifica su condición de microcuenca ya intervenida y afectada por actividades humanas

Los resultados dados en este trabajo proporcionan una guía para futuras investigaciones sobre el impacto en la recarga y almacenamiento como producto del cambio climático, acción humana y, proporciona información importante del posible grado de afección que pueda sufrir el páramo si en cualquiera de estas tres microcuencas se asentara una empresa minera que altere la cobertura vegetal, el suelo y los patrones de recarga.

Los riesgos presentes en estas microcuencas están relacionados al hecho de que altas precipitaciones y altos valores de escorrentía específica dan lugar a la extensión del daño más allá de los límites que la empresa minera establece, como puede ser el caso de Quinuahuaycu y Calluancay. Sin embargo precipitaciones y caudales específicos bajos da lugar a acumulaciones de tóxicos con concentraciones más altas, como podría ser el caso de Zhurucay. Tanto la acumulación como la extensión del daño causa problemas directos a la infiltración del agua y por ende a la recarga.

Las acciones de gestión incrementaron su intensidad e importancia con la explotación minera. Sin embargo, el éxito o fracaso de esta actividad no ha sido abordado y/o



medido de manera óptima, como proyección de daños al ecosistema del páramo. Esta investigación contribuye con una base para la supervisión y evaluación de las características de almacenamiento, recarga y la interacción entre agua superficial y subterránea existente.

5.2 Recomendaciones

La investigación realizada presenta un enfoque de la separación de flujo base, que es sólo un análisis de los muchos que se tendrían que hacer para constatar que la presencia de una actividad minera en estas zonas de páramo podría afectar de manera grave e irreparable fuentes hídricas, suelos, clima, fauna, flora y población. A continuación se presentan algunas recomendaciones de esta investigación y para futuras investigaciones a realizar:

- Para obtener datos más aproximados de flujo base, se debería de realizar un estudio más detallado a través de un análisis distribuido de los factores que afectan espacial y temporalmente la recarga.
- Para el empleo de los diferentes métodos de separación de flujo base se utilizó periodos distintos de precipitación, que son útiles para cuantificar la dinámica de recarga e identificar o clasificar zonas valiosas para mantener flujos bajos. Sin embargo, los patrones a largo plazo necesitan más series de datos que los utilizados en este estudio, es decir más series de datos completas y actuales, ya que a pesar de tener datos hasta el año 2016, no todos los días estaban completos, permitiendo solo un análisis de los años 2011 y 2012.
- Se puede elaborar en cada microcuenca una distribución de vegetación, es decir dependiendo del tipo de cobertura, realizar ensayos para determinar de manera más óptima el coeficiente de cultivo presente, según el tipo de vegetación y nivel de conservación. Ampliar la investigación clasificando cada microcuenca según su vegetación desde la más predominante a la menos remota y también el área que ocupa cada tipo de las mimas, ya sean bosques nativos, pajonales o bosques de pinos.
- Complementar esta investigación, usando como datos de entrada los diferentes escenarios de cambios de uso de suelo y clima en las tres microcuencas estudiadas. Este estudio ayudará a entender de manera más clara los daños que pueden causar empresas mineras en los recursos hídricos y suelos.
- Realizar estudios relacionados a la fase de explotación minera, en dónde se establecerán los posibles impactos causados por esta actividad, ya sea por cambios en la propiedades físicas y químicas de los suelos y agua por contaminación con minerales como el uso de tecnologías adecuadas para un mejor manejo de los recursos presentes en este ecosistema.



6. Bibliografía y referencias

- Acosta S. M., 1984. Los páramos andinos del Ecuador, Quito.
- Appleton J.D., Carrasco M., Orbea H., Williams T. M., 2001. Fluvial contamination associated with artisanal gold mining in the Ponce Enriquez, Portovelo-Zaruma and Nambija areas, Ecuador. *Water, air and soil pollution* 31.
- Arnold J., Allen P., 1999. Automated Methods for Estimating Baseflow and Ground Water Recharge from Streamflow Records¹.
- Atkins D., Calderon C., Montoya E., Morales E., 2005. Evaluación de calidad del agua en Cajamarca, Peru.
- Balslev H. y Luteyn J., 1992. Páramo. An Andean ecosystem under human influence. Academic Press, Londres.
- Barrera C. P. D., Torres V. C. O., 2010. Estudio sobre la generación de escorrentía en microcuencas de páramo con énfasis en la hidrofísica de suelos. Universidad de Cuenca.
- Bebbington A., Williams M., 2008. Water and Mining Conflicts in Peru. Mountain Research and Development.
- Bech J., Poschenrieder C., Llugany M., Barcelo J., Tume P., Tobias F. J., Barranzuela J. L., Vasquez E. R., 1997. Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in northern Peru. *The science of the total environment* 203, 83–91.
- Beltrán L. A. y Eguiguren S. J. I., 2010. Políticas públicas municipales, como herramientas de control socio – ambiental en las actividades de explotación minera de la provincia de Zamora Chinchipe.
- Bonilla O., 2013. Agua y minería en Quimsacocha. Quito – Ecuador.
- Buytaert W., Beven K., 2011. Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes* 25, 1784–1799.
- Buytaert W., Céleri R., De Bièvre B., Cisneros F., Wyseure G., Deckers J., Hofstede R., 2006a. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews* 79, 53–72.
- Buytaert W., De Bièvre B., Wyseure G., Deckers J., 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrology and earth system sciences* 8, 108–114.
- Buytaert W., Iñiguez V., Celleri R., De Bièvre B., Wyseure G., Deckers J., 2006c. Analysis of the water balance of small páramo catchments in South Ecuador. *Earth and environmental sciences, Environmental role of wetlands in headwaters* 63, 271–281.



Buytaert W., Wyseure G., De Bièvre B., Deckers J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* 19, 3985–3997.

Camacho M., 2013. Los páramos Ecuatorianos: Caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible. Quito, Ecuador.

CCME, 2007. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (summary tables No. update 7). Canadian Council of ministers of the environment.

Céleri R., Willems P., Buytaert W., Feyen J., 2007. Space – time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes.

Céleri R., Feyen J., 2009. The hydrology of Tropical Andean Ecosystems: importance, knowledge status and perspectives. *Mountain Research and development* 29, 350–355.

Centro de Cultura Popular Labor, 2013. Boletín Participación. Análisis participativo de la calidad de suelos en poblaciones afectadas por la actividad minera en Pasco.

Chang L., 1994. Gestión integral de cuencas Hidrográficas.

Chapman T., 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation.

Chow V., Maidment D., Mays L., 1988. Applied hidrology. McGraw – Hill Series in Water resources and Environmental Engineering.

Compañía minera de Yanacocha, n.d. Yanacocha [WWW Document]. Yanacocha - La Compania. URL <http://www.yanacocha.com.pe>

Corredor C., 2012. La consecuencia de la minería en los páramos. Página web: <http://angiecata.blogspot.com/2012/03/que-es-un-paramo-losparamos-son.html>

Crespo P., Feyen J., Buytaert W., Bücken A., Breuer L., Frede H-G., Ramírez M., 2011. Identifying controls of the rainfall – runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador).

De Bièvre B., Iñiguez V., Buytaert W., 2012. Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad., in: *Páramo. Paisaje Estudiado, Habitado, Manejado e Institucionalizado*.

Deza N., 2002. Oro, Cianuro y otras crónicas ambientales. En busca de una minería ambientalmente responsable/. Editorial Universitaria Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Peru.

Eckhardt K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation.

Eckhardt K., 2008. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods.



ELAW, Environmental Law Alliance Worldwide, 2010. Guía para evaluar EIAs de Proyectos Mineros.

Erazo M. T., 1957. Apuntes sobre la geología y estructura del Valle de Cuenca.

Esdat, 2009. Soil Remediation Circular 2009. Environmental Database Management Software.

Furey P., Gupta V., 2001. A physically based filter for separating base flow from streamflow time series.

Grufides, 2004. Al informe final de la evaluación ambiental de las actividades de exploración en el proyecto yanacocha zona sur cuenca del río Porcón - Cerro Quilish.

Guzmán C. P., 2015. Identifying hydrological processes controlling low flow and groundwater – Surface water interaction in an Andean catchment in Ecuador.

Guzmán P., Batelaan O., Huysmans M., Wyseure G., 2015. Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador.

Harden C. P., 2006. Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology* 79, 249–263.

Hedberg I., y O. Hedberg., 1979. Tropical – alpine life – forms of vascular plants. *Oikos*.

Hofstede R.G.M., Segarra P., y Mena Vásconez P. (eds.). 2003. Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia, Quito.

Huyck A., Pauwels V., Verhoest N., 2005. A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes.

Ibáñez A. S., Gisbert B. J. M., Moreno R. H., 2011. Histosoles. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.

Ibáñez J. J., Manríquez F. J., 2011a. Los Androsoles: Suelos Volcánicos.

Ibáñez J. J., Manríquez F. J., 2011b. Histosoles: Las Turberas.

Iñiguez V., 2003. Balance hídrico de microcuencas de páramo. (Master theses). Universidad de Cuenca, Cuenca.

Jasso-Pineda Y., Espinosa-Reyes G., González-Mille D., Razo-Soto I., Carrizales L., Torres-Dosal A., Mejía-Saavedra J., Monroy M., Ize A.I., Yarto M., Díaz-Barriga F., 2007. An integrated health risk assessment approach to the study of mining sites contaminated with arsenic and lead. *Integrated environmental assessment and management* 3, 344–350.



Labor, 2008. Estudio de la Calidad de Aguas de los ríos Huallaga, San Juan y Tingo. (Boletín No. 18), Participación. Labor, Cerro de Pasco.

Labor, 2009. Evaluación de la Calidad de los Recursos Hídricos en la Provincia de Pasco y de la Salud en el Centro poblada de Paragsha. Asociación civil centro de cultura popular Labor, Cerro de Pasco.

Lim K., Engel B., Tang Z., Choi J., Kim K., Muthukrishnan S., Tripathy D., 2005. Automated Web Gis Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT.

Luteyn J. 1999. Páramos: A checklist of plant diversity, geographic distribution, and botanical literature. *Memoirs of the New York Botanical Garden* 84: 1-278.

Lyne V., Hollick M., 1979. Stochastic time – variable rainfall – runoff modelling. In *Hydrology and Water Resources Symposium*. Institut of Engineers Australia.

Medina G. y Mena P., 2001. Los páramos del Ecuador. Pp. 1-23 En: Mena, P., G. Medina y R.G.M. Hofstede (eds.). *Los Páramos del Ecuador. Proyecto Páramo y Abya Yala*, Quito.

Mena V. P., Hofstede R., 2006. *Los páramos Ecuatorianos*. Ecociencia, Salazar E14-34 y Av. Coruña, Quito, Ecuador.

Mena P., Medina G., 1999. El páramo como fuente de recursos hídricos.

MINEO Consortium (2000) "Review of potential environmental and social impact of mining." <http://www2.brgm.fr/mineo/UserNeed/IMPACTS.pdf>

Mol J. H., Ouboter P. E., 2004. Downstream effects of erosion from small-scale gold mining on the instream habitat and fish community of a small neotropical rainforest stream. *Conservation biology* 18, 201–214.

Mollo M. N., 2009. Preocupaciones socio – ambientales por la minería en Oruro. Operaciones mineras proyecto Kori Kollo Inti Raymi.

Montoya J. C., Mendieta R. S., 2006. Salinización y metales pesados: evaluación de la mina Kori Kollo. CEPA, Oruro, Bolivia.

Nathan R.J., McMahon T. A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses.

Organización Mundial de la Salud (2006, 2008) "Guía para la Calidad del Agua de Bebida, tercera edición, Incluye la primera y segunda adenda" http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es/index.html

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (1985) "Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects," 53 FAO Irrigation and Drainage Paper. <http://www.fao.org/docrep/V8350E/v8350e00.htm#Contents>.



Palacios-Berrios H., 2006. Assessing landscape change in a mining area of the Peruvian Andes. A case study in the Yanacocha mine, Cajamarca. (Theses). University of Bergen, Bergen.

P.C.A. ingenieros consultores S.A., 2011. Auditorio ambiental a las operaciones mineras Kori Kollo: informe fase II. (Environmental Audit). ministerio de medio ambiente y agua de Bolivia, Oruro.

Placlet M., 2013. Impact of mining in the Andes. Case study: potential impact on the hydrology of the páramo in Quimsacocha, Ecuador.

Podwojewski P., 1999. Los suelos de las altas tierras Andinas: Los páramos del Ecuador.

Podwojewski P., Poulenard J., Zambrana T., Hofstede R., 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). Soil use and management 18, 45–55.

Prasad R., 1967. A nonlinear hydrologic system response model.

PROMAS, 2009. Estudio Edafológico: Informe segundo año.

PROMAS, 2015. Datos de temperatura en Quimsacocha.

Quantin Q., Zebrowski C., 1997. Caractérisation et formation de la cangahua en Equateur. IN: Suelos Volcánicos endurecidos. Memorias del III Simposio Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos, Quito, Ecuador.

Ramírez M. M., Cisneros E. P., 2015. Determinación de anomalías causadas a las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas, en los suelos de páramo en el Sur del Ecuador, ocasionadas por alteraciones antrópicas.

Razo I., Carrizales L., Castro J., Diaz-Barriga F., Monroy M., 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. Water, air and soil pollution 152, 129–152.

Roa – García M., Brown S., Schreier H., Lavkulich L., 2011. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes.

Sacher W., Acosta, A., 2012. La minería a gran escala en Ecuador. Análisis y datos estadísticos sobre la minería industrial en el Ecuador., first edition. ed. Abya-Yala, Quito, Ecuador.

Smarkhtin V., 2001. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 147-186.

Spongberg M., 2000. Spectral analysis of base flow separation with digital filters.

Tallaksen L., 1995. A review of baseflow recession analysis.



Vargas O. y Rivera D., 1991. "El páramo, un ecosistema frágil", en Bosques y Desarrollo. No. 2:45-48. Bogotá.

Vásconez P. M., Hofstede R., 2006. Los páramos ecuatorianos. Botánica económica de los Andes Centrales. 91–109.

Velásquez T. A., 2012. The science of corporate social responsibility (CSR): Contamination and conflict in a mining project on the Southern Ecuadorian Andes. Resources Policy 37, 233–240.

Vogel R., Kroll C., 1996. Estimation of baseflow recession constants.

Volcán Compañía Minera S. A. A., 2015. Reporte de Sostenibilidad 2015 Volcán.

WHO, 2007. World Health Organization. Exposure to mercury: A major public health concern. Documento PDF. Geneva, Switzerland, 4 págs. Descargado de <http://www.who.int/phe/news/Mercury-flyer.pdf>.

Wiener F. R. y Torres P. J., 2014. La Gran minería ¿Paga los impuestos que debería pagar? El caso Yanacocha.

Wittenberg H., 1994. Nonlinear analysis of flow recession curves.

Wittenberg H., 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes.

Wittenberg H., Sivapalan M., 1999. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation.



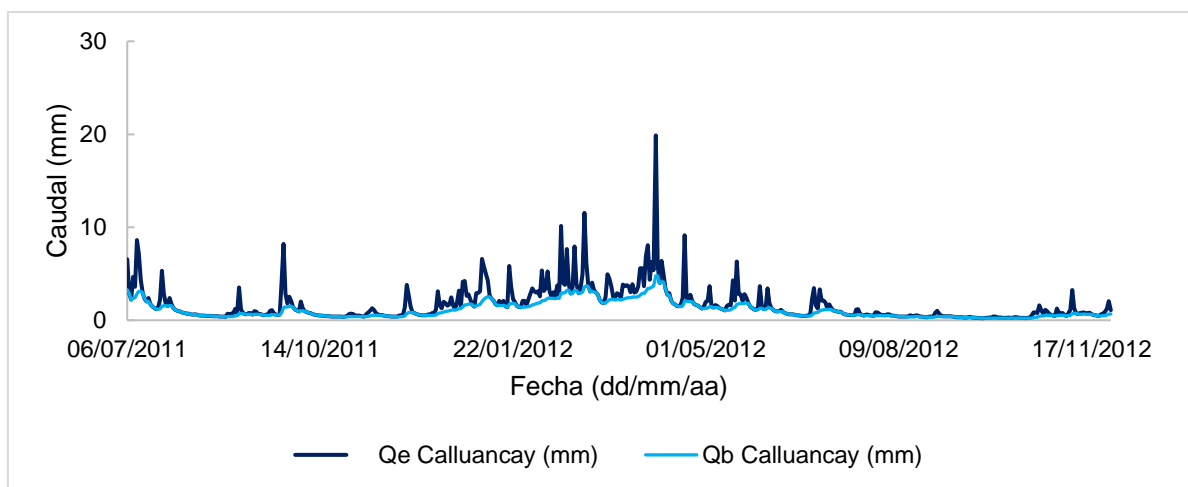
7. Anexos

7.1 ANEXO 1

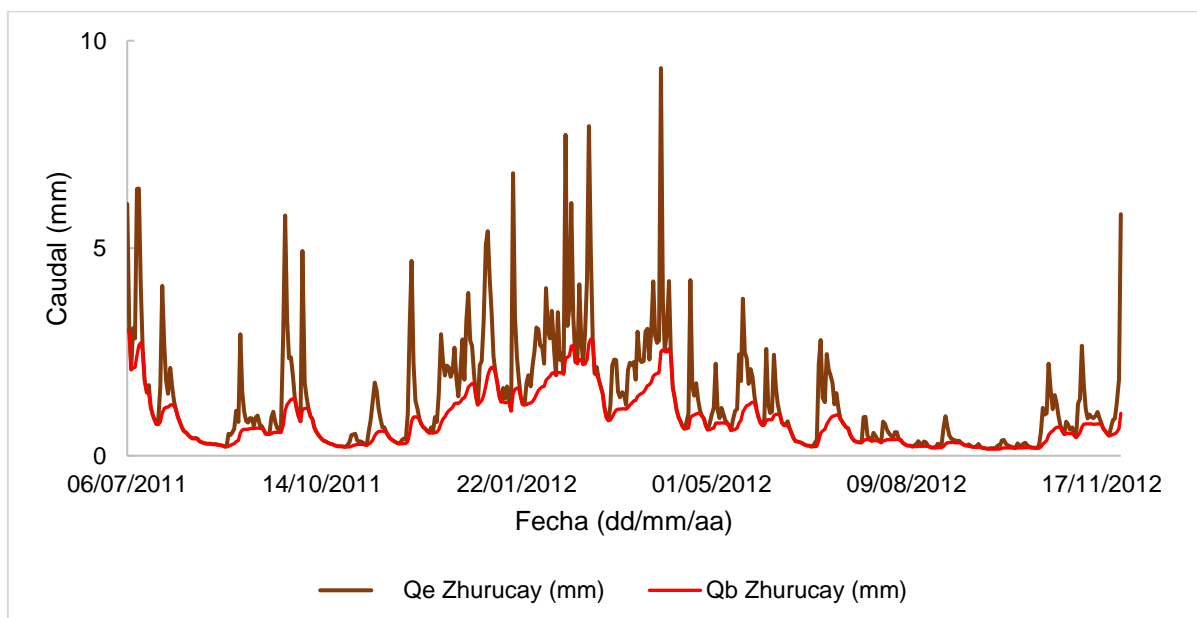
7.1.1 RESULTADOS DE CADA MICROCUENCA CON CADA MÉTODO DE ANÁLISIS.

7.1.1.1 FILTROS DIGITALES: a) Flujo base Calluancay con Eckh= 0,80; b) Flujo base Zhurucay con Eckh= 0,80; c) Flujo base Quinuahuaycu con Eckh= 0,80.

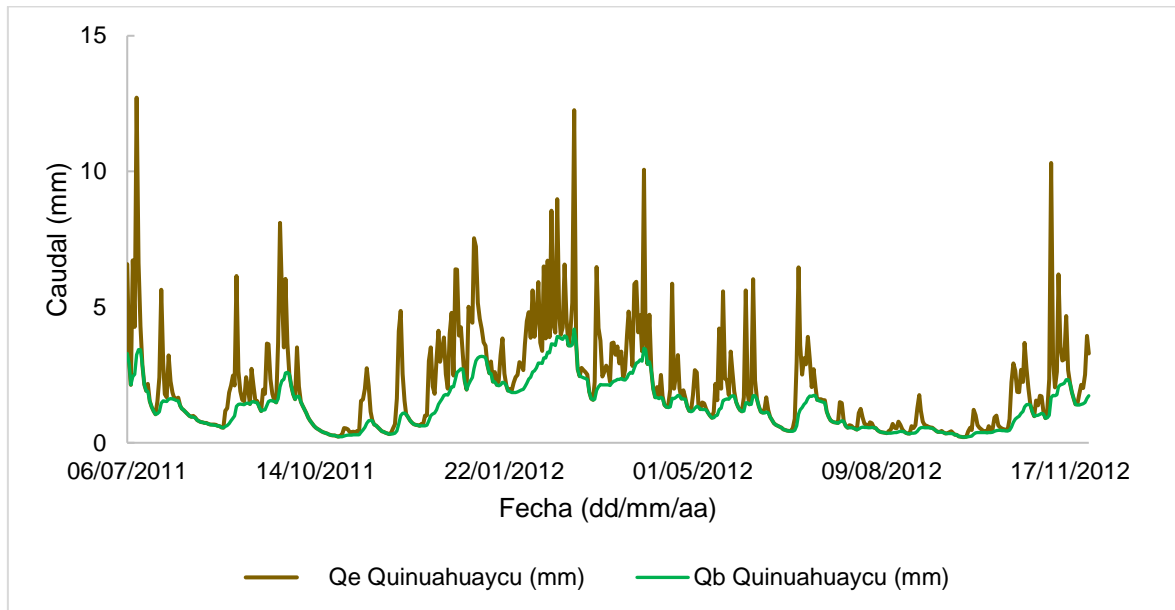
a)



b)



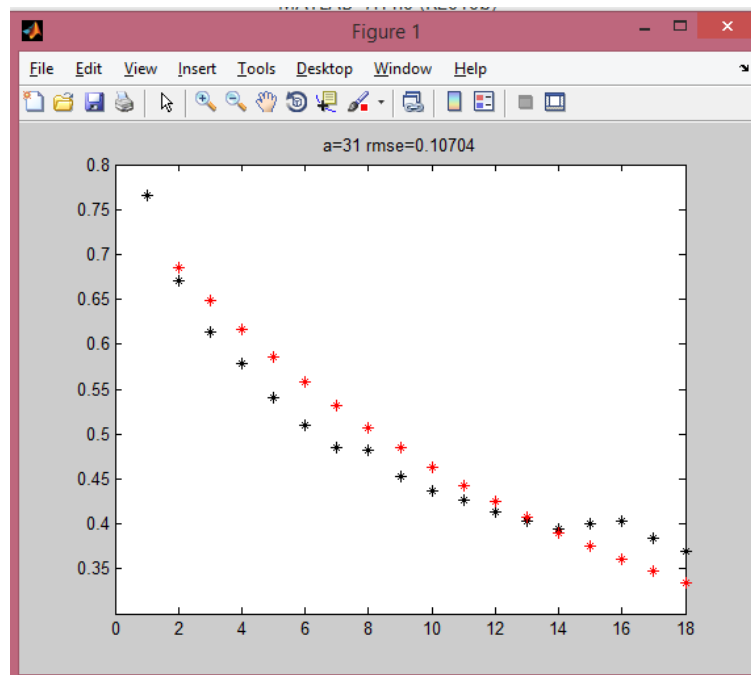
c)



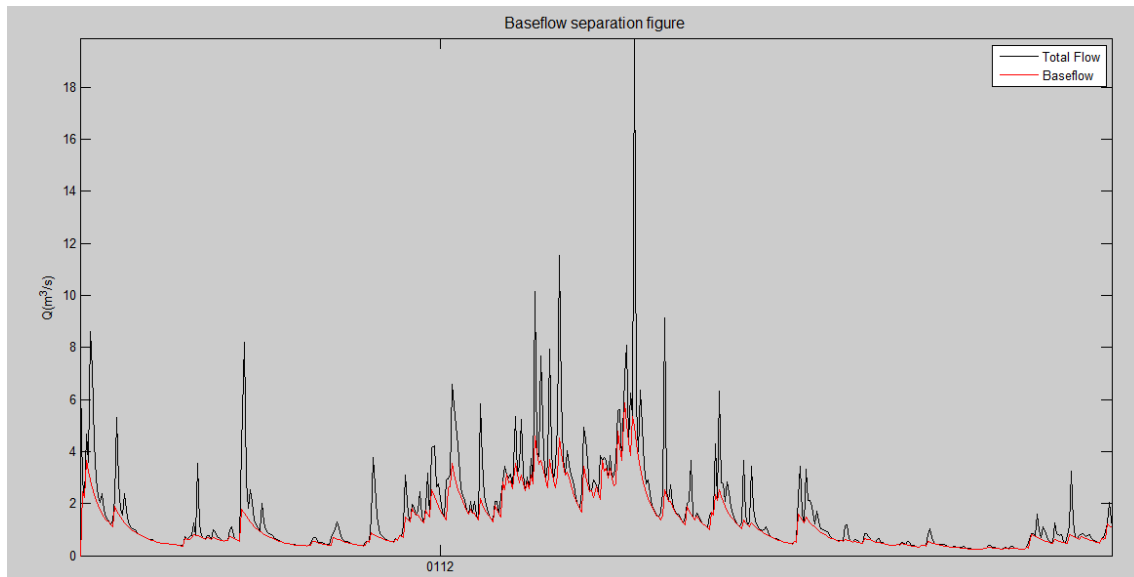
7.1.1.2 REGRESIÓN NO LINEAL

7.1.1.2.1 MICROCUENCA CALLUANCAY: a) Gráfica del valor de a; b) Figura de separación del flujo base.

a)

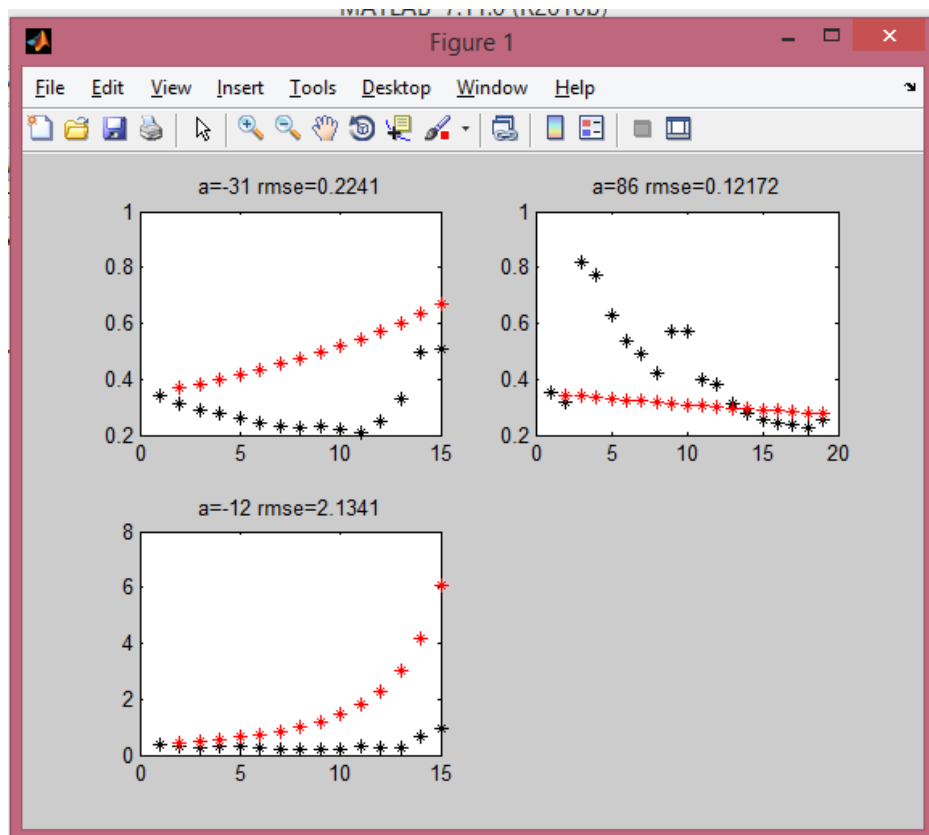


b)

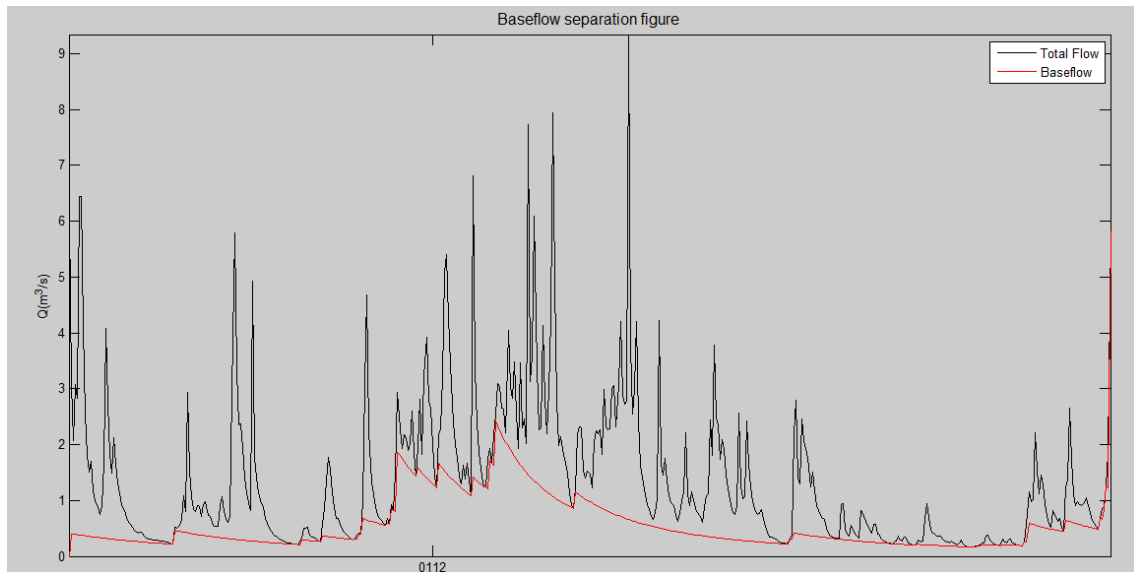


7.1.1.2.2 MICROCUENCA ZHURUCAY: a) Gráficas de los valores de a; b) Figura de separación del flujo base.

a)

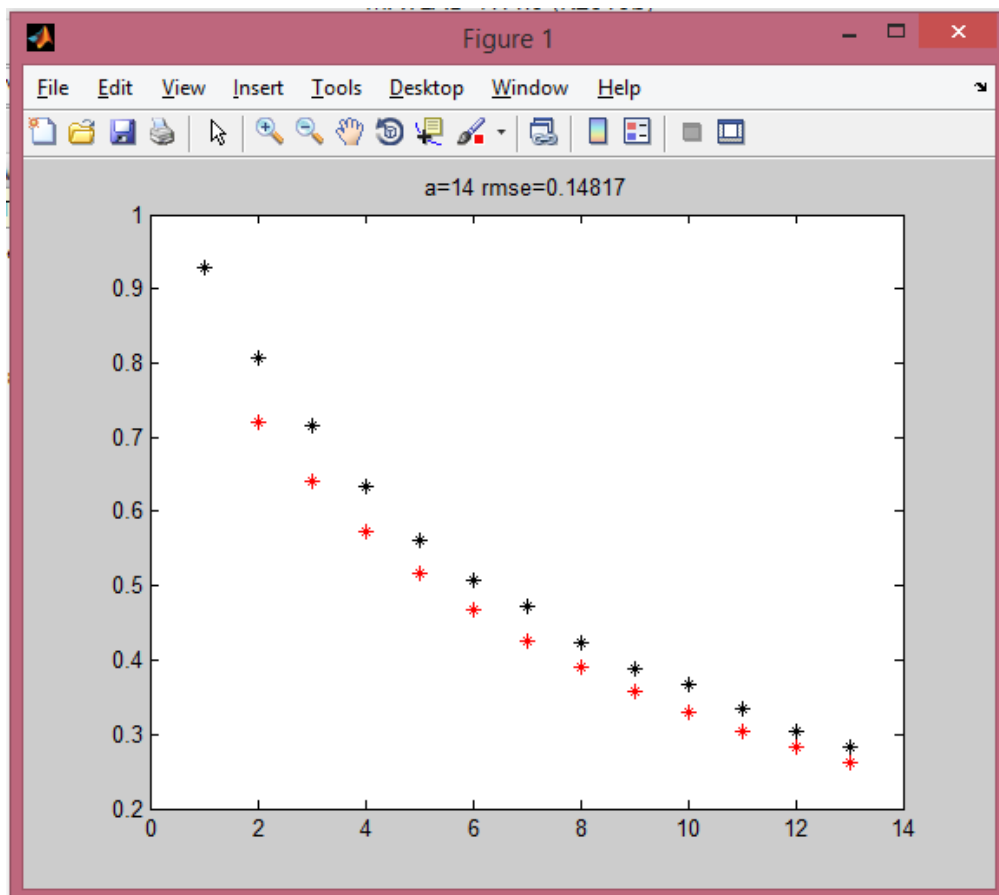


b)

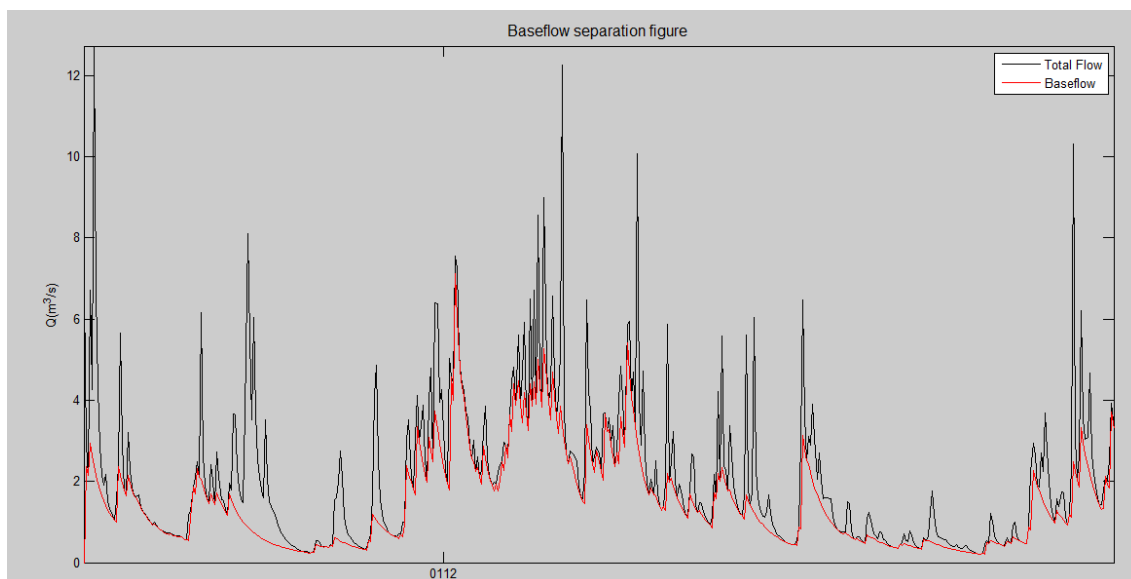


7.1.1.2.3 MICROCUENCA QUINUAHUAYCU: a) Gráfica del valor de a ; b) Figura de separación del flujo base.

a)

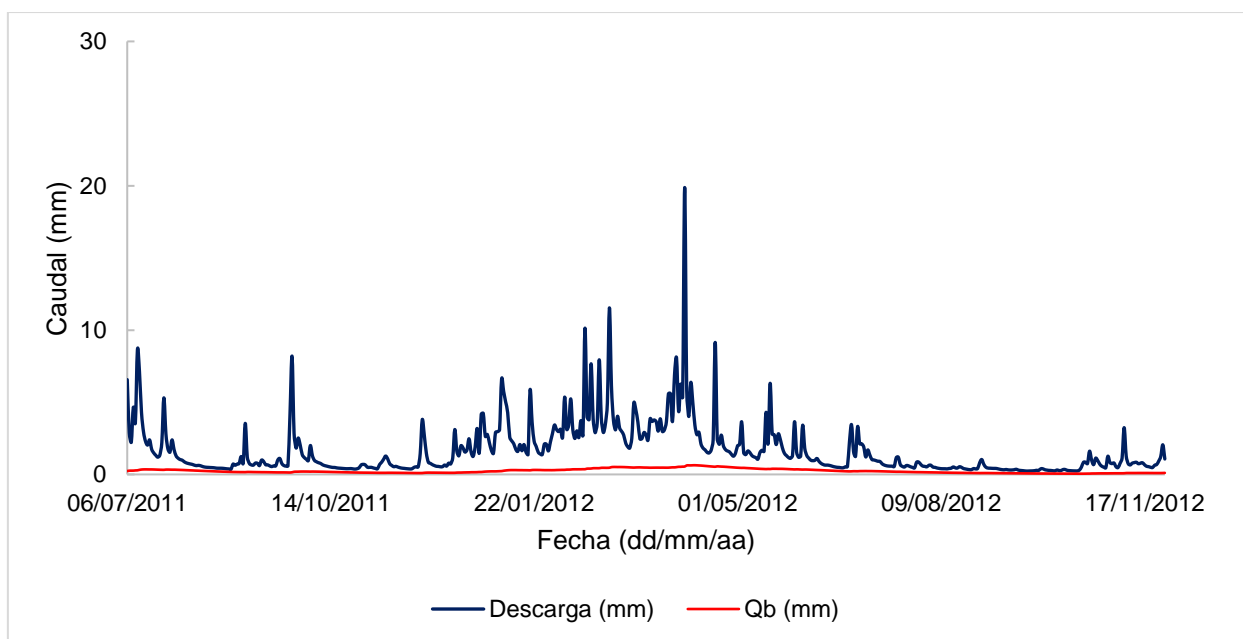


b)



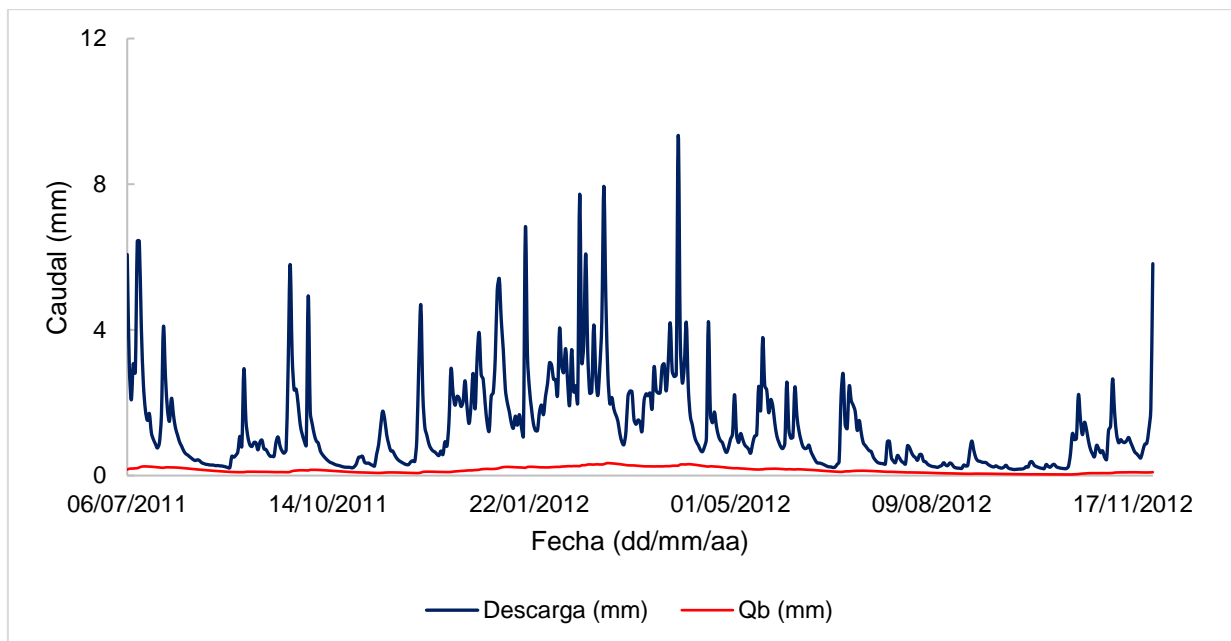
7.1.1.3 FILTROS FÍSICOS: a) Caudal base de Calluancay; b) Caudal base de Zhurucay; c) Caudal flujo base Quinuahuaycu.

a)

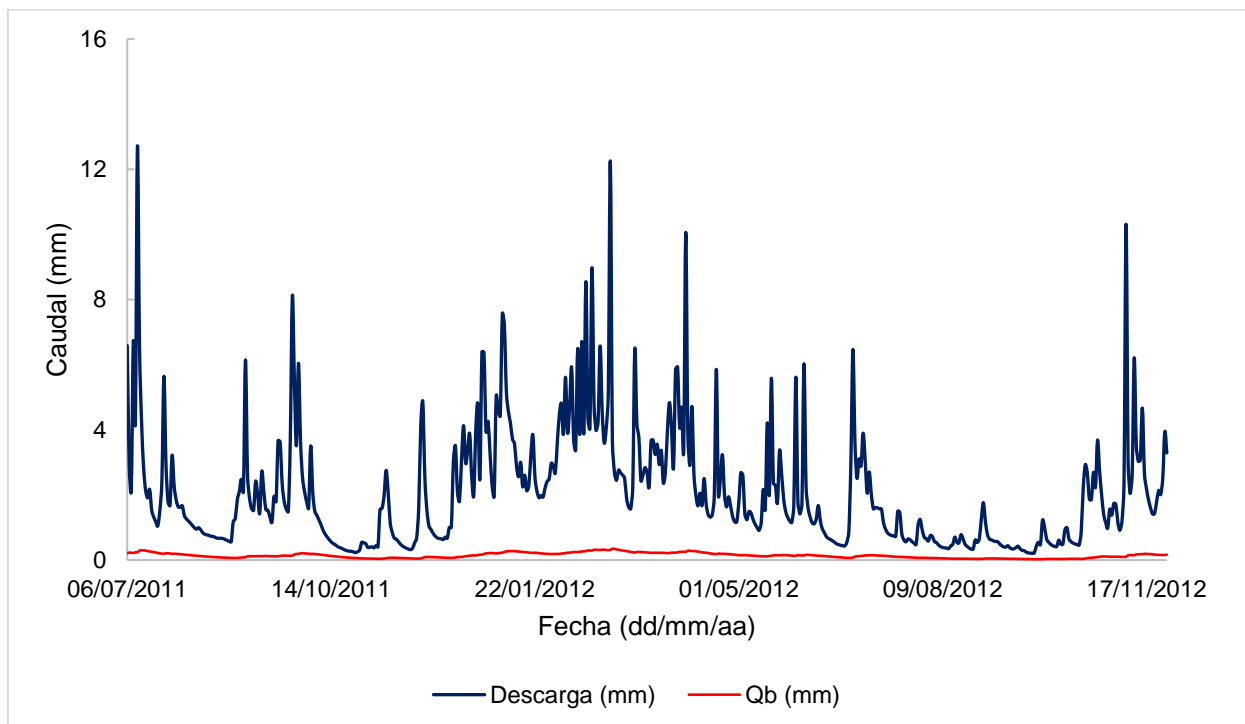




b)



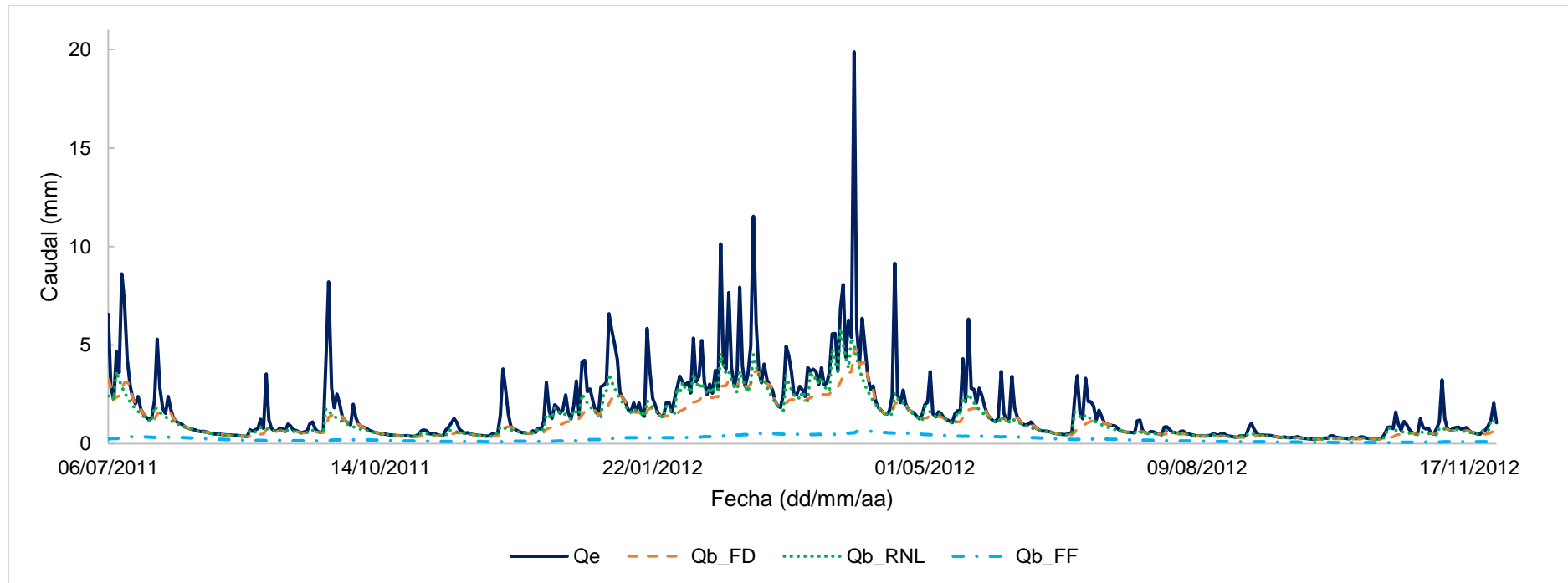
c)



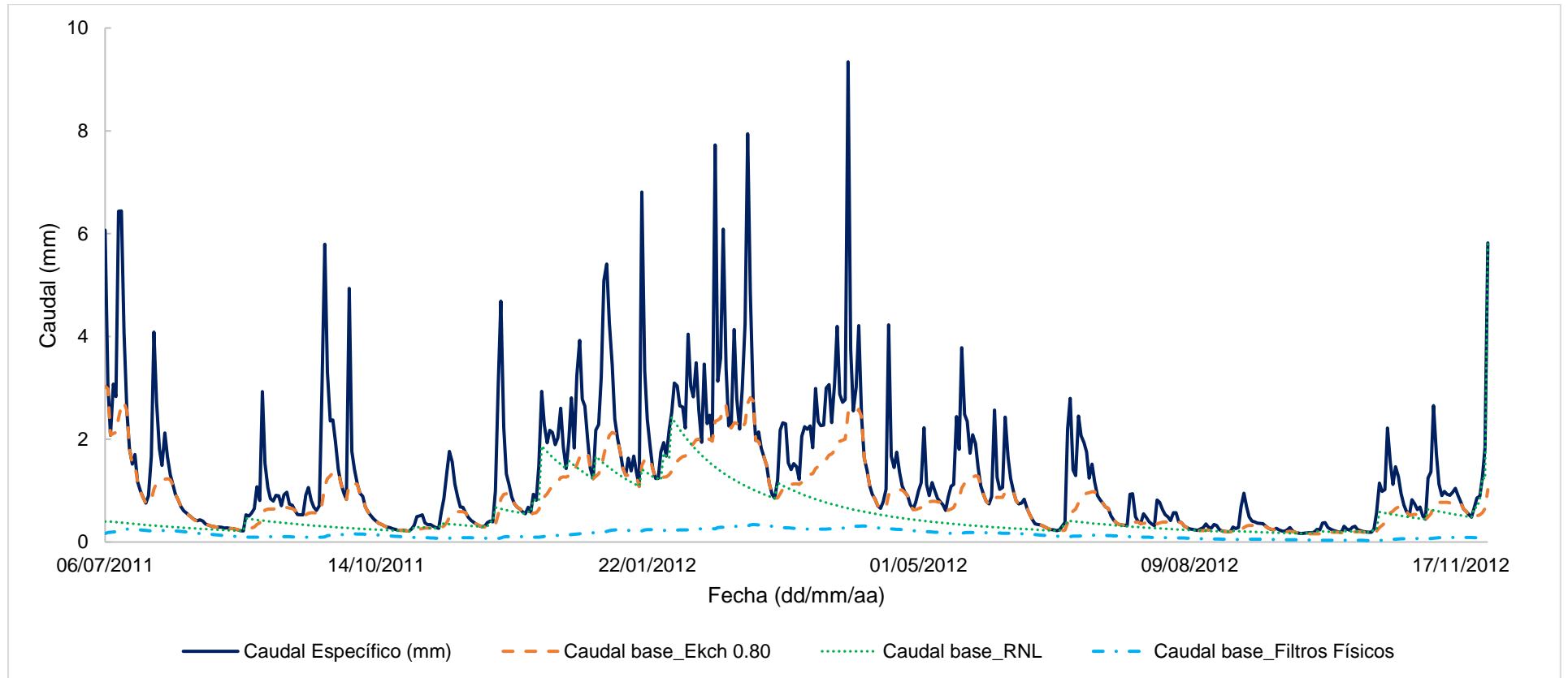


7.1.2 RESULTADOS DE CADA MICROCUENCA CON LOS TRES MÉTODOS DE ANÁLISIS: a) Microcuenca de Calluancay; b) Microcuenca de Zhuruca; c) Microcuenca de Quinuahuaycu.

a)



b)



c)

